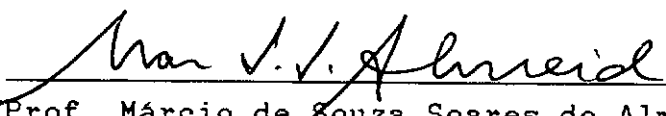
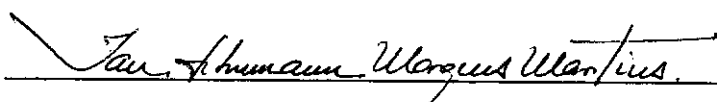



Paulo Sérgio de Almeida Barbosa


TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSARIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA CIVIL.

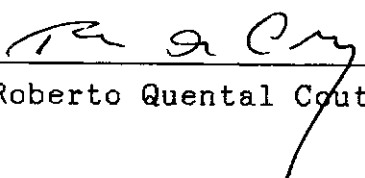
Aprovada por:


Prof. Márcio de Souza Soares de Almeida, Ph.D.
(Presidente)


Prof. Ian Schumann Marques Martins, M.Sc.


Prof. Márcio Miranda Soares, D.Sc.


Prof. Paulo Eduardo Lima de Santa Maria, Ph.D.


Prof. Roberto Quental Coutinho, D.Sc.

BARBOSA, PAULO SÉRGIO DE ALMEIDA

Ensaio de Adensamento de Fluxo Restringido
e K_o em Argila Mole [Rio de Janeiro] 1990
XI, 161 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, Ms.C.,
Engenharia civil, 1990)

Tese - Universidade Federal do Rio de
Janeiro, COPPE

1. Ensaio de adensamento I.COPPE/UFRJ II Título
(série)

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Márcio de Souza Soares de Almeida pela firme e dedicada orientação, pelo apoio e amizade oferecidos.

Aos Professores Ian Schumann e Maurício Ehrlich por me proporcionarem a oportunidade de dar continuidade ao desenvolvimento da célula K_o .

À Dr. G. C. Sills que gentilmente cedeu o equipamento de fluxo restringido durante a realização deste trabalho.

Ao Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico, pelo auxílio financeiro na realização deste trabalho.

Aos funcionários do Laboratório de Geotecnia da COPPE/UFRJ, em especial aos engenheiros Sérgio Iório, Alvaro Dellé Viana e Eduardo Nazareth Paiva, pelo apoio, empenho e ensinamentos na montagem dos ensaios.

Aos colegas Sérgio Roberto Ladeira Carvalho, Marco Antonio Durães e Vicente Perez Espinosa pelo agradável convívio e pela amizade.

Ao colega Francisco José Teixeira Coelho Ladaga pela confiança dispensada.

Em especial ao colega e amigo Emídio Neto de Souza Lira pela sua amizade, dedicação e incentivo que tornaram menos árdua o cumprimento de mais esta etapa.

À Denise pelo apoio e compreensão.

A todos que direta ou indiretamente contribuíram para a elaboração desta tese.

Resumo da Tese Apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

ENSAIOS DE ADENSAMENTO DE FLUXO RESTRINGIDO E K_0 EM ARGILA MOLE

PAULO SERGIO DE ALMEIDA BARBOSA

Fevereiro - 1990

Orientador : Márcio de Souza Soares de Almeida
Programa : Engenharia Civil

O presente trabalho pretende avaliar o desempenho do equipamento para ensaio de adensamento de fluxo restringido realizado na argila mole do Sarapuí.

São apresentados ensaios de adensamento incremental cujos resultados são comparados com os de fluxo restringido. Obteve-se boa concordância entre os resultados desses dois tipos de ensaio.

Os valores do coeficiente de adensamento para os ensaios incrementais e da tensão de pré-adensamento para ambos os ensaios foram determinados por vários métodos e comparados.

Descreve-se também uma célula triaxial K_0 desenvolvida na COPPE/UFRJ que permite o adensamento anisotrópico e isotrópico, além do cisalhamento como no triaxial convencional. A comparação de um ensaio de adensamento K_0 em caulim com o ensaio incremental indicou boa concordância entre os resultados de ambos os ensaios.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

RESTRICTED FLOW AND K_0 CONSOLIDATION TESTS IN SOFT CLAY

PAULO SÉRGIO DE ALMEIDA BARBOSA

February - 1990

Thesis Supervisor : Márcio de Souza Soares de Almeida
Department : Civil Engineering

It is the main purpose of this study to evaluate the performance of restricted flow consolidation test carried out in Sarapuá soft clay.

Standard incremental consolidation tests have also been performed and the results of these are compared with results of restricted flow consolidation tests. Good agreement between results of these two types of tests has been obtained by a number of methods are compared.

A triaxial K_0 cell developed at COPPE/UFRJ and allowing anisotropic and isotropic consolidation besides shearing is presented. A K_0 consolidation test in Kaolin is compared with an incremental test and good agreement is obtained between results of both tests.

ÍNDICE

	Pag.
I - INTRODUÇÃO	01
I.1 <i>Considerações Preliminares</i>	01
I.2 <i>Objetivos da Tese e Conteúdo dos Capítulos</i> ..	02
II - ENSAIO DE ADENSAMENTO EDOMÉTRICO INCREMENTAL ..	04
II.1 <i>Introdução</i>	04
II.2 <i>Equipamentos, Procedimento e Materiais</i>	04
II.2.1 <i>Equipamentos Utilizados</i>	04
II.2.2 <i>Procedimento de Ensaio</i>	04
II.2.3 <i>Solo Ensaiado</i>	05
II.3 <i>Curva e : $\log \sigma'_v$ do ensaio Edométrico Incremental</i>	05
II.3.1 <i>Fatores que influenciam a posição da curva e : $\log \sigma'_v$</i>	06
II.4 <i>Determinação da Tensão de Pré-Adensamento</i> ..	09
II.4.1 <i>Método de Casagrande</i>	09
II.4.2 <i>Método de Pacheco Silva</i>	09
II.4.3 <i>Método de Pacheco Silva Modificado</i> ..	12
II.4.4 <i>Outros Métodos</i>	12
II.5 <i>Determinação do Coeficiente de Adensamento</i> ..	12
II.5.1 <i>Métodos de Taylor e Casagrande</i>	13
II.5.1.1 <i>Método de Taylor</i>	14
II.5.1.2 <i>Método de Casagrande</i>	17
II.5.1.3 <i>Comentários Sobre os Dois Métodos</i>	17
II.5.2 <i>Método de Scott</i>	19
II.5.2.1 <i>Introdução</i>	19
II.5.2.2 <i>Procedimento Gráfico</i>	20
II.5.2.3 <i>Vantagens e desvantagens</i> ...	23
II.5.3 <i>Método de Su</i>	23
II.5.3.1 <i>Determinação do Coeficiente de adensamento</i>	25
II.5.3.2 <i>Comentários</i>	27

II.5.4	<i>Método da Velocidade ou Método de Parkin</i>	27
II.5.4.1	<i>Introdução</i>	27
II.5.4.2	<i>Procedimento</i>	28
II.5.5	<i>Outros Métodos</i>	31
II.6	<i>Apresentação e Discussão dos Resultados</i>	31
II.6.1	<i>Curva índice de vazios versus tensão efetiva vertical</i>	32
II.6.2	<i>Tensão de Pré-Adensamento</i>	43
II.6.3	<i>Coeficiente de Adensamento</i>	46
II.6.4	<i>Coeficiente de Compressibilidade Volumétrica</i>	56
II.7	<i>Conclusões Parciais</i>	62
III -	ENSAIO DE ADENSAMENTO DE FLUXO RESTRINGIDO	64
III.1	<i>Introdução</i>	64
III.2	<i>Ensaio Edométrico Contínuo</i>	64
III.2.1	<i>Ensaio à Velocidade de Deformação Constante</i>	65
III.2.2	<i>Outros Ensaio Contínuos</i>	66
III.3	<i>Descrição do Equipamento de Adensamento de Fluxo Restringido</i>	67
III.3.1	<i>Princípio do Ensaio</i>	67
III.3.2	<i>Esquema Geral do Ensaio</i>	71
III.3.3	<i>Célula Edométrica com Fluxo Restringido</i>	71
III.3.4	<i>Sistema de Aplicação de Carga</i>	74
III.3.5	<i>Restritor de Fluxo</i>	76
III.3.6	<i>Instrumentação</i>	76
III.3.7	<i>Sistema de Aquisição de Dados</i>	79
III.4	<i>Resultados dos Ensaio</i>	80
III.4.1	<i>Valores medidos durante o ensaio</i>	80
III.4.2	<i>Influência da deformação da célula</i>	84
III.4.3	<i>Curvas de índice de vazios versus tensão efetiva vertical</i>	84
III.4.4	<i>Coeficiente de Adensamento</i>	96
III.4.5	<i>Coeficiente de Compressibilidade Volumétrica</i>	96
III.4.6	<i>Módulo Edométrico</i>	97

III.4.7 Tensão de Pré-adensamento	108
III.5 Conclusões Parciais	110
IV - ENSAIO DE ADENSAMENTO K_0	112
IV.1 Introdução	112
IV.2 O Ensaio K_0	112
IV.2.1. Princípio do Ensaio	112
IV.2.2. Revisão Bibliográfica.....	113
IV.3 A Célula K_0 Desenvolvida na COPPE	116
IV.3.1. Princípio da Célula K_0	117
IV.3.2. Descrição da Célula K_0	117
IV.4 Instrumentação Utilizada nos Ensaio K_0	121
IV.5 Sistema de Aquisição de Dados	122
IV.6 Materiais	123
IV.7 Ensaio Preliminares	124
IV.8 Resultados do Ensaio definitivo.....	125
IV.9 Comentários sobre a Célula K_0	132
V - CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISA.....	133
V.1 Conclusões	133
V.1.1 Ensaio Incrementais	133
V.1.2 Ensaio de Fluxo Restringido	134
V.1.3 Ensaio K_0	135
V.2 Sugestões para pesquisa	135
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	136
APENDICE A.....	144
APENDICE B.....	156

SIMBOLOGIA

C_c	: Índice de compressão
c_v	: Coeficiente de adensamento
d_p	: Leitura de deformação ao final do adensamento primário
d_s	: Leitura de deformação corrigida
d_t	: Leitura de deformação no tempo t
Δe	: variação do índice de vazios
$\Delta \log \sigma'_v$: variação da tensão efetiva vertical na escala log
$\Delta \sigma'$: variação de tensão efetiva
$\Delta \varepsilon_v$: variação de deformação específica vertical
e	: Índice de vazios
e_0	: Índice de vazios inicial
e_{100}	: Índice de vazios ao final do adensamento primário
E_{ed}	: Módulo edométrico
ε_v	: Deformação específica
γ_v	: Peso específico da água
H	: Espessura da camada
H_d	: Máxima distância de drenagem
k	: Coeficiente de permeabilidade do solo
K_0	: Coeficiente de empuxo no repouso
m_v	: Coeficiente de compressibilidade volumétrica
R	: Índice de adensamento residual
R_c	: Razão de compressão
S	: Inclinação da tangente máxima
σ	: Tensão total
σ'_v	: Tensão efetiva
σ'_{vm}	: Tensão efetiva vertical máxima
σ'_{vo}	: Tensão efetiva vertical atual
σ'_b	: Tensão efetiva na base
σ'_t	: Tensão efetiva no topo
σ'_m	: Tensão efetiva média
t	: Tempo
t_{50}	: Tempo para 50 % de adensamento
t_{90}	: Tempo para 90 % de adensamento
T_v	: Fator Tempo adimensional
T_{50}	: Fator Tempo para 50 % de adimensional
T_{90}	: Fator Tempo para 90 % de adimensional

u	: Poro pressão
u_b	: Poro pressão na base
u_m	: Poro pressão média
u_t	: Poro pressão no topo
U	: Grau de adensamento médio
z	: Profundidade

I - INTRODUÇÃO

1.1 - CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES.

Quando uma camada de solo saturado é solicitada pela aplicação de um carregamento, um excesso de poro pressão é gerado ao longo desta camada. Este excesso de poro pressão dissipa-se a medida em que parte da água contida nos poros do solo é drenada, sendo esta velocidade de drenagem função das condições de drenagem da camada e das propriedades hidrodinâmicas do solo. Para se fazer uma análise do comportamento e do desempenho da superestrutura que carrega o solo, torna-se necessário conhecer o seu comportamento sob estas condições.

Assim, os ensaios de adensamento e em menor grau o de compressão triaxial foram desenvolvidos com a finalidade de fornecerem parâmetros capazes de prever o comportamento da camada de solo quando solicitada. Esta previsão consiste em se calcular o valor do recalque total, o tempo para que este ocorra e como o recalque se processa ao longo do tempo, além das propriedades elásticas e de resistência do solo.

As estimativas de recalques de fundações de estruturas tais como edifícios, aterros, pontes, etc, de uma maneira geral, são feitas empregando-se métodos nos quais muitas hipóteses simplificadoras foram necessárias para desenvolvê-los. Dentre estas hipóteses, uma que pode produzir grande discrepância entre valores teóricos e valores de campo é a consideração de deformações unidimensionais.

Em situações em que não se pode considerar que os carregamentos tenham extensão infinita, ou seja, espessura da camada maior que a largura da área carregada, podem ocorrer deformações laterais significativas, fazendo com que as previsões de recalques não sejam realísticas. Nestas situações, a previsão de recalques requer um tratamento tridimensional, onde normalmente se usa a teoria da elasticidade. Para tanto é necessário que se disponha de

parâmetros elásticos determinados num estado de tensões compatível com a situação real de campo, utilizando-se, por exemplo, o ensaio triaxial.

A análise de estabilidade e de resistência é feita utilizando-se em geral parâmetros obtidos a partir de amostras adensadas isotropicamente, diferente do estado anisotrópico que ocorre no campo.

Tendo em vista estas discrepâncias, novas modalidades de ensaios vêm sendo desenvolvidas. Como exemplo pode-se citar os ensaios de adensamento com carregamentos contínuos e os ensaios de compressão triaxial com adensamento anisotrópico.

1.2 - OBJETIVOS DA TESE E CONTEÚDO DOS CAPÍTULOS.

Esta dissertação se insere na linha de pesquisa de ensaios de adensamentos especiais da COPPE (Carvalho, 1989). Pretende-se em particular avaliar o desempenho do equipamento para ensaio de fluxo restringido desenvolvido na Universidade de Oxford.

Pretende-se também fazer uma comparação dos resultados deste ensaio com os de adensamento incremental. Estes resultados assim como a descrição da célula de fluxo restringido são apresentados no capítulo III.

Propõem-se ainda com uma menor ênfase apresentar uma célula triaxial K_0 desenvolvida na COPPE e que permite o adensamento anisotrópico e isotrópico, além do cisalhamento como no ensaio triaxial convencional. A descrição dessa célula e os resultados obtidos com a mesma são apresentados no capítulo IV.

Outro objetivo deste trabalho é apresentar um estudo comparativo entre diversos métodos de cálculo do coeficiente de adensamento e da tensão de pré-adensamento no ensaio de adensamento edométrico incremental. Essa parte da tese, apresentada no capítulo II, se insere na linha de pesquisa do estudo de compressibilidade e adensamento através de ensaios incrementais, a exemplo das teses de Coutinho (1976), Martins (1983) e Vieira (1988) entre

outros.

A argila mole do Sarapuí, por ter suas propriedades intensamente estudadas, foi o solo utilizado nos ensaios de adensamento incremental e de fluxo restringido.

No capítulo V apresentam-se as conclusões gerais de todos os capítulos.

II - ENSAIO DE ADENSAMENTO EDOMÉTRICO INCREMENTAL

II.1 - INTRODUÇÃO.

Este capítulo tem como objetivo apresentar inicialmente uma revisão dos diversos métodos de determinação do coeficiente de adensamento e da tensão de pré-adensamento, obtidos através do ensaio edométrico incremental. Apresenta-se finalmente os resultados dos ensaios realizados com a argila orgânica do Sarapuí.

II.2 - EQUIPAMENTOS, PROCEDIMENTO E MATERIAIS.

II.2.1 - EQUIPAMENTOS UTILIZADOS.

O equipamento utilizado para a realização dos ensaios apresentados neste capítulo é constituído por uma prensa com pendural, tipo Bishop, e por uma célula rígida, dentro da qual se aloja um anel de aço com 100,9 mm de diâmetro e 30 mm de espessura. Este anel é do tipo fixo e possui uma face biselada para facilitar a operação de moldagem do corpo de prova. As medidas de deslocamento da face superior do corpo de prova devido ao acréscimo de tensão foram feitas por um extensômetro fabricado pela Mitutoyo, com sensibilidade de 10^{-2} mm.

II.2.2 - PROCEDIMENTO DE ENSAIO.

O corpo de prova foi montado entre duas pedras porosas para se permitir drenagem por ambas as faces, e mantido submerso durante todo o ensaio. Os incrementos de carga foram aplicados numa razão $\Delta\sigma/\sigma = 1$, sendo aplicadas tensões de: 5, 10, 20, 40, 80, 160, 320 e 640 kPa em estágios de carregamento de 24 horas.

II.2.3 - SOLO ENSAIADO.

O solo utilizado nos ensaios apresentados neste capítulo é a amostra de argila do Sarapuí (Coutinho, 1976; Ortigão, 1979). A amostra de argila foi extraída por amostrador Shelby de 125 mm de diâmetro à 4 profundidades na Área Teste do IPR - DNER na Baixada Fluminense, próximo ao aterro experimental II, sendo descartados os primeiros 15 cm da amostra para eliminar a parte do material que sofre maior amolgamento.

II.3 - CURVA $e : \log \sigma'_v$ DO ENSAIO EDOMÉTRICO INCREMENTAL.

Na curva **tensão : deformação** representada no gráfico $e : \log \sigma'_v$ observa-se um trecho inicial quase horizontal e um outro trecho inclinado aproximadamente linear, denominado **reta virgem**, cuja inclinação é chamada de **índice de compressão**, representado por C_c , e definido por,

$$C_c = - \frac{\Delta e}{\Delta \log \sigma'_v} \quad (2.1)$$

Uma curva **tensão : deformação** típica é apresentada na figura 2.1. A figura 2.2 apresenta um gráfico **tensão : deformação** com ciclos de carregamento e descarregamento.

Dependendo do estado de tensão em que o solo se apresenta, ele pode ser considerado como **normalmente adensado** se a tensão aplicada ao solo, σ'_{vo} , for a máxima tensão por ele já suportada σ'_{vm} , ou seja $\sigma'_{vo} = \sigma'_{vm}$, trechos *bc* e *fg* na figura 2.2; ou **pré - adensado** se a tensão a que ele está submetido for menor que a máxima já suportada por ele ($\sigma'_{vo} < \sigma'_{vm}$) trechos *ab* e *def*, na figura 2.2.

II.3.1 - FATORES QUE INFLUENCIAM A POSIÇÃO DA CURVA $e : \log \sigma'_v$.

Com os estudos feitos por Leonards e Ramiah (1959), Hamilton e Crawford (1959), Leonards e Girault (1961), Crawford (1964), Leonards e Altschaeffl (1964) e Bjerrum (1967, 1972) os quais investigaram principalmente a influência de diversos procedimentos de carregamento (razão de carregamento, duração do incremento de carga), grandes avanços foram dados para se conhecerem os diversos processos que influenciam a posição da curva $e : \log \sigma'_v$.

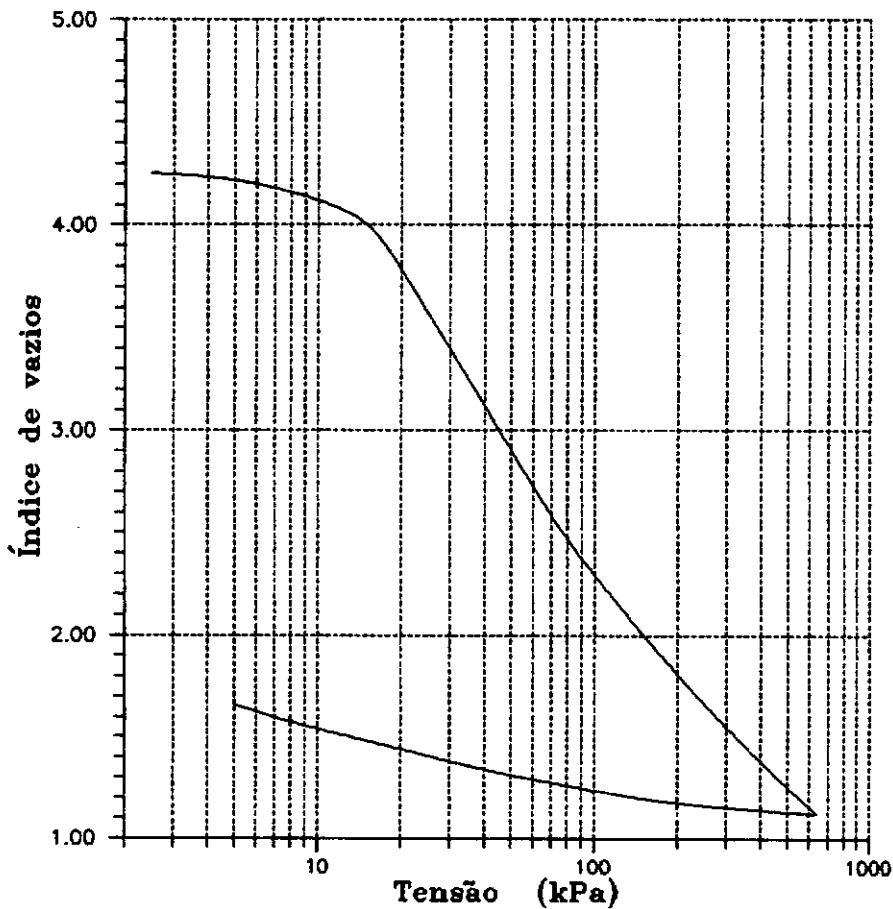


Figura 2.1 - Índice de vazios : tensão efetiva.

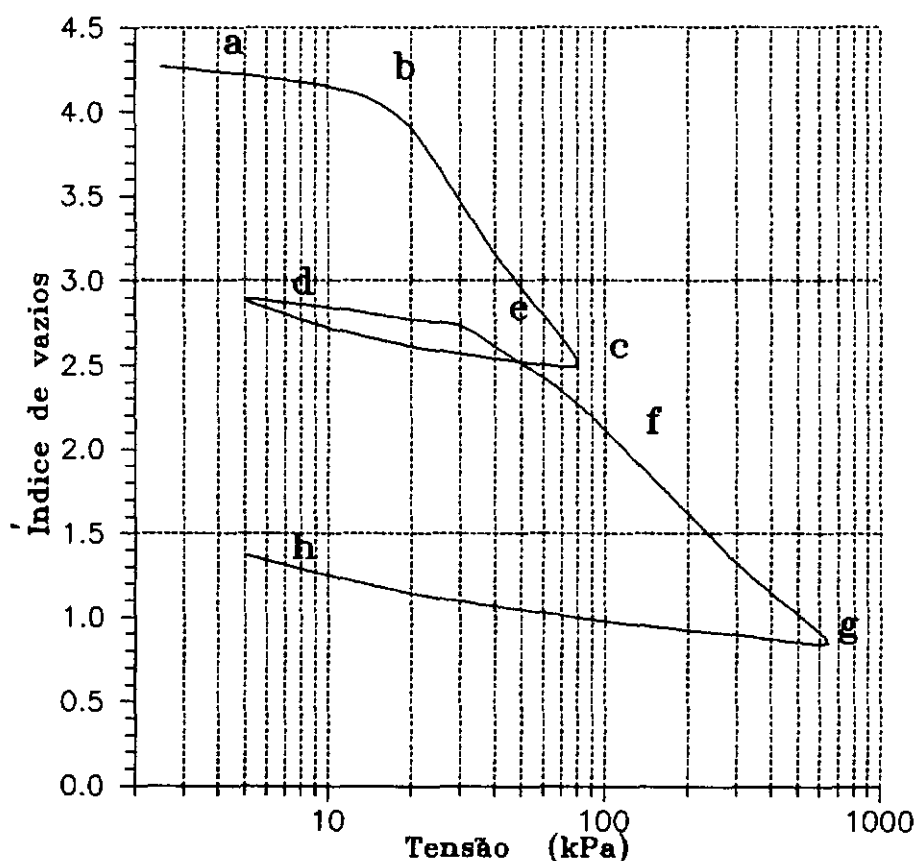


Figura 2.2 - Índice de vazios : tensão efetiva, com ciclos de descarregamento e recarregamento.

Estes estudos mostraram, com clareza que a posição da curva tensão : índice de vazios depende da velocidade de aplicação de carga (duração do estágio de carregamento no caso do ensaio incremental). Assim, quanto maior for a duração da aplicação do incremento de carga, maior será o deslocamento da curva e : $\log \sigma'_v$, para baixo e para a esquerda como ilustrado na figura 2.3.

Um estágio de carregamento de longa duração produz no solo uma mudança de estrutura devido à compressão secundária. Isto pode ser melhor explicado quando se

considera um depósito argiloso recente, normalmente adensado sob uma tensão σ'_{vo} e com índice de vazios e_o . Se uma amostra de solo for extraída deste depósito, sendo em seguida adensada no laboratório, a mesma apresentará uma tensão de pré-adensamento igual a σ'_{vo} .

Por outro lado, se este depósito permanecer estável por milhares de anos sob esta tensão σ'_{vo} , ele apresentará um índice de vazios e_1 menor que e_o . Se da mesma forma, uma amostra de solo deste depósito for extraída e recarregada no laboratório, o valor da tensão de pré-adensamento será

***** Final do Adensamento Primário
 oooooo Adensado por 24 Horas

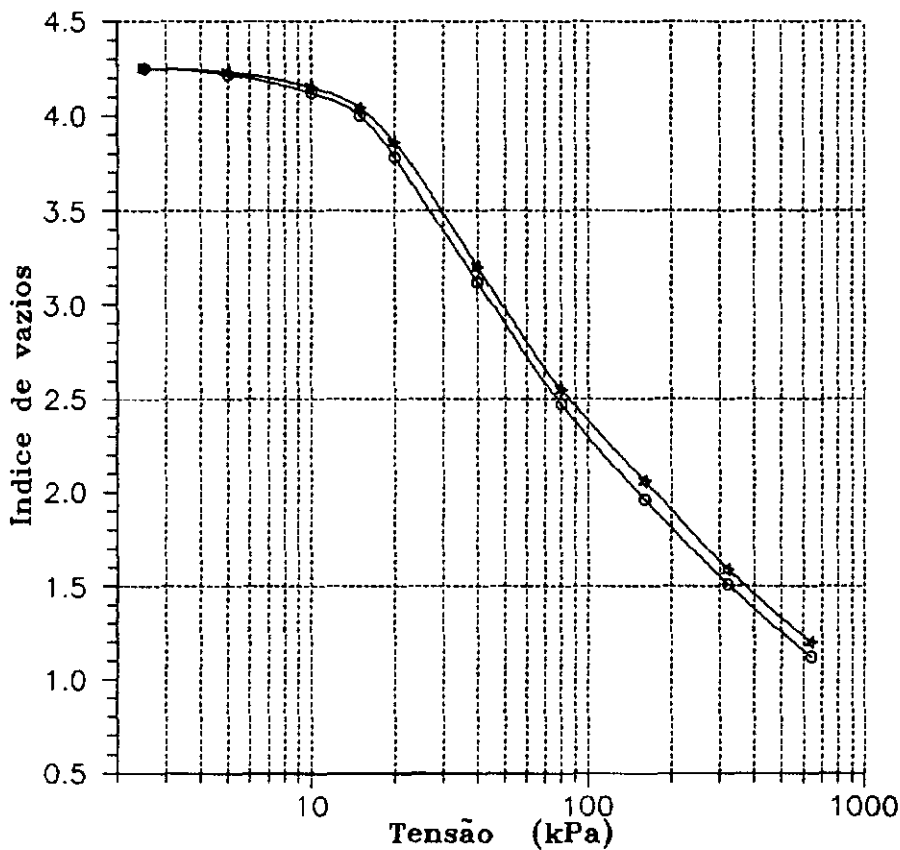


Figura 2.3 - Influência do tempo de aplicação de pressão no ensaio de adensamento incremental.

maior que σ'_{v0} . Neste caso σ'_{vm} é denominado por Leonards e Altschaeffl (1964) de tensão de quase-pré-adensamento e de tensão crítica por Bjerrum (1967).

Crawford (1964) apresentou resultados em que a tensão de pré-adensamento σ'_{vm} pode ter seu valor reduzido à metade, dependendo da velocidade de aplicação da carga; 265 kPa ao fim do adensamento primário e 133 kPa após uma semana de adensamento.

Os diversos mecanismos que provocam no solo o efeito de pré-adensamento são apresentados por Ladd, 1971, e aqui resumidos na tabela 2.1.

II.4 - DETERMINAÇÃO DA TENSÃO DE PRÉ-ADENSAMENTO.

Existem na literatura vários métodos para a determinação da tensão de pré-adensamento; aqueles que serão utilizados neste trabalho são apresentados a seguir.

II.4.1 - MÉTODO DE CASAGRANDE.

A determinação da tensão de pré-adensamento pelo método de Casagrande (Taylor, 1948) pode ser feita através da curva $e : \log \sigma'_v$. Na curva tensão : deformação estima-se o ponto de maior curvatura. Através deste ponto, traça-se uma horizontal e uma tangente à curva. Marca-se em seguida a bissetriz do ângulo formado entre a horizontal e a tangente. A abscissa do ponto de interseção do prolongamento da reta virgem com a bissetriz representa a tensão de pré-adensamento, σ'_{vm} .

II.4.2 - MÉTODO DE PACHECO SILVA.

Para se determinar a tensão de pré-adensamento pelo método de Pacheco Silva (1970), o seguinte procedimento é seguido: na curva $e : \log \sigma'_v$ uma reta horizontal é traçada passando por e_0 , índice de vazios inicial, prolongando-se a

Tabela 2.1 - Mecanismos que causam o efeito de pré - adensamento no solo - Ladd, 1971.

Mecanismos	Referências e observações
Mudança na tensão total <i>.Remoção da sobrecarga</i> <i>.Estruturas anteriores</i> <i>.Glaciação</i>	
Mudança na poro pressão devido a mudança do N.A.: <i>.Pressões Artesianas</i> <i>.Bombeamento</i> <i>.Dessecação</i>	Kenney (1964) Áreas Glaciais Várias regiões Durante a deposição
Mudança na estrutura do solo devido a compressão secundária.	Raju (1965); Leonards e Ramiah (1960); Leonards e Altschaeffl (1964); Bjerrum (1967, 1972).
Mudanças ambientais, tais como pH, temperatura e concentração de sal.	Lambe (1958)
Alterações químicas devido ao intemperismo, precipitação de agentes cimentantes, troca de íons.	Bjerrum (1967)
Mudança da velocidade de deformação durante o carregamento.	Lowe (1974)

reta virgem até interceptar a horizontal por e_0 . Por este ponto é traçada uma vertical até interceptar a curva $e : \log \sigma'_v$ e por esta intersecção é traçada uma horizontal. A abscissa da intersecção desta horizontal com o prolongamento da reta virgem representa a tensão de pré-adensamento (figura 2.4).

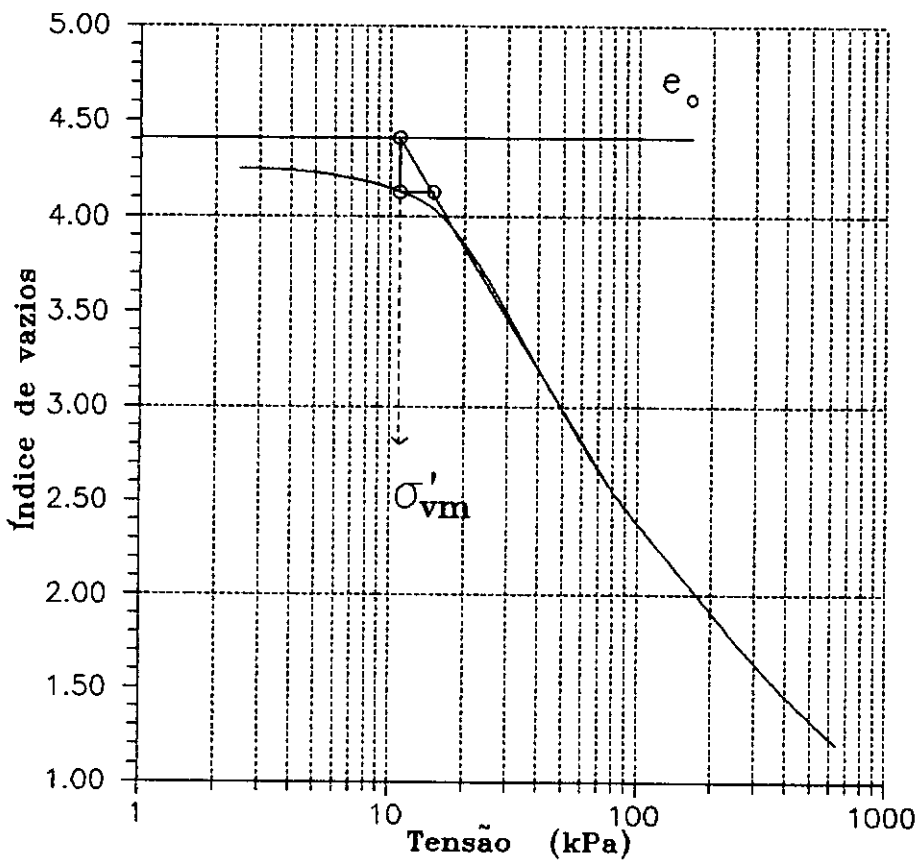


Figura 2.4 - Método de Pacheco Silva

II.4.3 - MÉTODO DE PACHECO SILVA MODIFICADO.

Este método proposto por Martins (1983) é semelhante ao método anterior, porém utiliza a curva $\log(1 + e) : \log \sigma'_v$. O objetivo de se utilizar a escala bilogarítmica é a linearização do trecho de compressão virgem, o que elimina a interpretação pessoal de quem utiliza o método.

II.4.4 - OUTROS MÉTODOS.

Janbu (1969) sugere determinar a tensão de pré-adensamento através do ponto de mínimo local da curva módulo edométrico : tensão. Define-se módulo edométrico E_{ed} como

$$E_{ed} = \frac{\Delta \sigma'}{\Delta \epsilon_v}$$

onde $\Delta \epsilon_v$ é a variação de deformação específica vertical devido à variação de tensão $\Delta \sigma'$.

Burmister (1951) e Schmertmam (1955) apresentam métodos para a determinação da tensão de pré-adensamento nos quais são necessários um ciclo de descarregamento e recarregamento.

II.5 - DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE ADENSAMENTO.

A equação de adensamento unidimensional obtida por Terzaghi (1925) é expressa por

$$c_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{\partial u}{\partial t} \quad (2.2)$$

onde u é o excesso de poro pressão gerado pelo acréscimo de carga; t e z são as coordenadas de tempo e espaço,

respectivamente, e c_v é o coeficiente de adensamento definido por:

$$c_v = \frac{k}{m_v \gamma_v} \quad (2.3)$$

sendo:

k é o coeficiente de permeabilidade do solo,

γ_v é o peso específico da água, e

m_v é o coeficiente de compressibilidade volumétrica, definido por

$$m_v = \frac{1}{E_{ed}}$$

O valor de c_v determina a velocidade com a qual um solo se deformará quando solicitado por um acréscimo de tensão. Pela equação 2.3, pode-se ver que para um mesmo solo, quanto maior for a sua permeabilidade, mais rápido se dará o adensamento, pois c_v será maior. Por outro lado, quanto mais compressível for o solo, tanto maior será o tempo necessário para que o adensamento se processe totalmente, uma vez que maior quantidade de água terá que sair da massa de solo, e assim o solo apresentará menor c_v .

Com os dados obtidos de um ensaio de adensamento edométrico incremental, o coeficiente de adensamento de um solo pode ser obtido através de vários métodos, descritos abaixo.

II.5.1 - MÉTODOS DE TAYLOR E CASAGRANDE.

Os métodos de Taylor e de Casagrande são os mais conhecidos e comumente empregados para a determinação do coeficiente de adensamento.

A solução da equação 2.2 (Taylor, 1948) fornece uma função $u(z,t)$, que é a função de distribuição do excesso de poro pressão ao longo da camada de solo para um tempo t qualquer.

A equação de $u(z,t)$ e as condições de contorno para a obtenção desta equação são apresentados em Martins (1983), não sendo do escopo deste trabalho apresentá-las.

Definindo-se grau de adensamento médio como

$$U = \frac{1}{H} \int_0^H \left(1 - \frac{u}{u_0} \right) dz \quad (2.4)$$

onde H é a espessura da camada, o valor de U pode ser expresso com excelente aproximação pelas seguintes equações empíricas

$$\left. \begin{aligned} U (\%) &= \left[\frac{4 T_v}{\pi} \right]^{0.5} * 100 \\ &\text{ou} \\ T_v &= \frac{\pi}{4} \left[\frac{U (\%)}{100} \right]^2 \end{aligned} \right\} \quad \text{para } U < 53 \% \quad (2.5A)$$

(2.5B)

$$U (\%) = 100 - \exp \left(\frac{1.781 - T_v}{0.933} \right) \quad \text{para } U > 53 \% \quad (2.5C)$$

$$\text{onde } T_v = \frac{c_v t}{H_d^2}$$

e H_d é a máxima distância de drenagem.

Nestes dois métodos a determinação de c_v é feita utilizando-se ajustes das curvas **deformação : tempo** obtidas do ensaio de adensamento edométrico incremental.

II.5.1.1 - MÉTODO DE TAYLOR.

Segundo o método de Taylor, os dados de deformação devem ser traçados em uma escala aritmética versus a raiz quadrada do tempo, \sqrt{t} , sendo desta forma, o método

também chamado de "Método da \sqrt{t} ". Ambos os métodos utilizam-se de propriedades características e distintas da curva teórica de adensamento de Terzaghi, ou seja, da semelhança das curvas deformação : tempo observados, (em suas respectivas escalas de tempo), com a curva teórica $U : T_v$.

Pela equação (2.54) pode-se ver que traçando-se os dados de deformação : tempo em uma escala \sqrt{t} , a fase inicial do adensamento ($U < 53\%$) será linear. Por outro lado, uma reta que passa por $U = 0$ e $U = 90\%$ tem uma inclinação 15 % maior que a reta da fase linear inicial, citada acima. Por exemplo: para $U = 90\%$ tem-se $T_v = 0,848$ e

$$\sqrt{T_v} = 0,921$$

$$\sqrt{T'_v} = \frac{\sqrt{T_v}}{1,15} = 0,801$$

$$T'_v = 0,641$$

Substituindo T'_v na equação (2.54) tem-se $U' = 90\%$

A utilização do método de Taylor consiste em se fazer um ajuste da condição inicial da curva deformação : \sqrt{t} , que é a intersecção da fase linear extrapolada, com o eixo das deformações, como mostrado na figura 2.5. Sobre esta curva o valor de tempo, t_{90} , para $U = 90\%$ de adensamento é obtido pela intersecção da curva deformação : \sqrt{t} com uma reta de inclinação 15 % maior que a inclinação da reta da fase linear inicial da curva deformação : \sqrt{t} . Com este valor de t_{90} e com o valor de $T_{90} = 0,848$, que é o fator tempo para $U = 90\%$, o valor de c_v pode ser calculado conhecendo-se a máxima distância de drenagem, H_d , e utilizando-se a equação:

$$c_v = \frac{T_{90} H_d^2}{t_{90}} \quad (2.6)$$

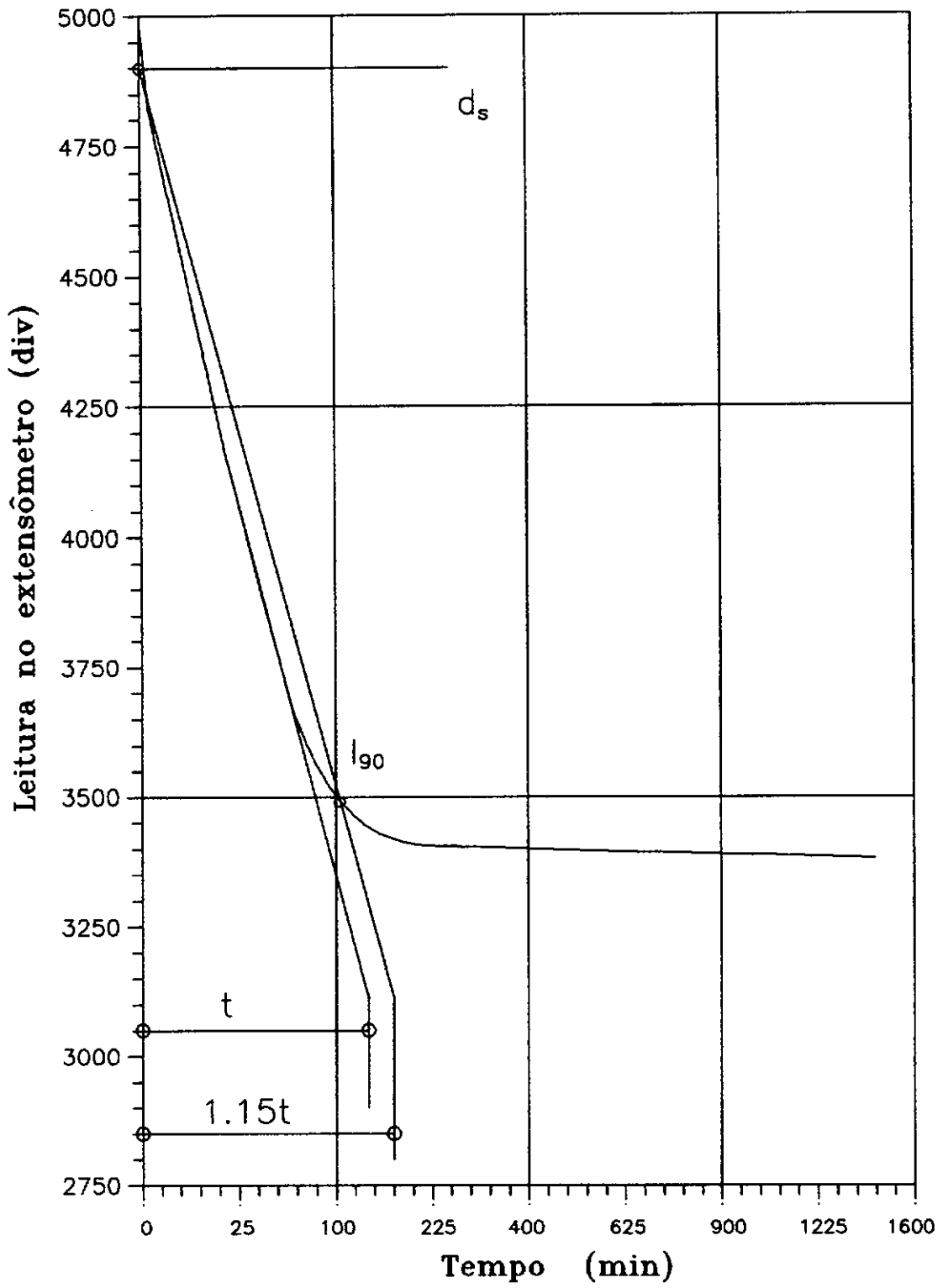


Figura 2.5 - Método de Taylor.

O valor de H_d a ser utilizado em (2.6) corresponde ao valor médio do início e fim do incremento de carga.

II.5.1.2 - MÉTODO DE CASAGRANDE.

Na utilização do método de Casagrande é necessário que os resultados de deformação sejam traçados em uma escala aritmética versus escala logarítmica de tempo, sendo por este motivo chamado "Método $\log t$ ".

Em seu método, Casagrande avalia a leitura inicial da fase de consolidação determinando-se o foco da parábola da equação 2.5B, que representa 0 % do adensamento primário. A determinação do foco desta parábola num gráfico deformação : $\log t$ é feita tomando-se dois tempos t_1 e t_2 , tal que $t_2 = 4t_1$ e subtraindo-se a diferença de deformação entre t_1 e t_2 do valor da deformação correspondente a t_1 , como mostrado na figura 2.6.

O final do adensamento primário é determinado através da intersecção da extrapolação da fase linear do adensamento, na escala deformação : $\log t$, com o prolongamento da fase de compressão secundária. Com a média dos valores de 0 % e 100 % de deformação calcula-se a deformação correspondente à 50 % do adensamento e determina-se o tempo t_{50} correspondente conforme mostrado na figura 2.6. Com os valores de t_{50} , $T_{50} = 0,197$ e H_d , calcula-se c_v por uma equação similar à (2.6).

II.5.1.3 - COMENTÁRIOS SOBRE OS DOIS MÉTODOS.

Ambos os métodos apresentam imperfeições em suas construções, haja vista as discrepâncias entre os resultados encontrados pelos dois métodos, com uma tendência do método de Taylor resultar em valores de 1,5 a 2 vezes maior que o método de Casagrande. Os erros que podem advir das construções de Casagrande e Taylor estão relacionados com as correções da curva deformação : tempo em suas respectivas escalas. Estes problemas se devem ao

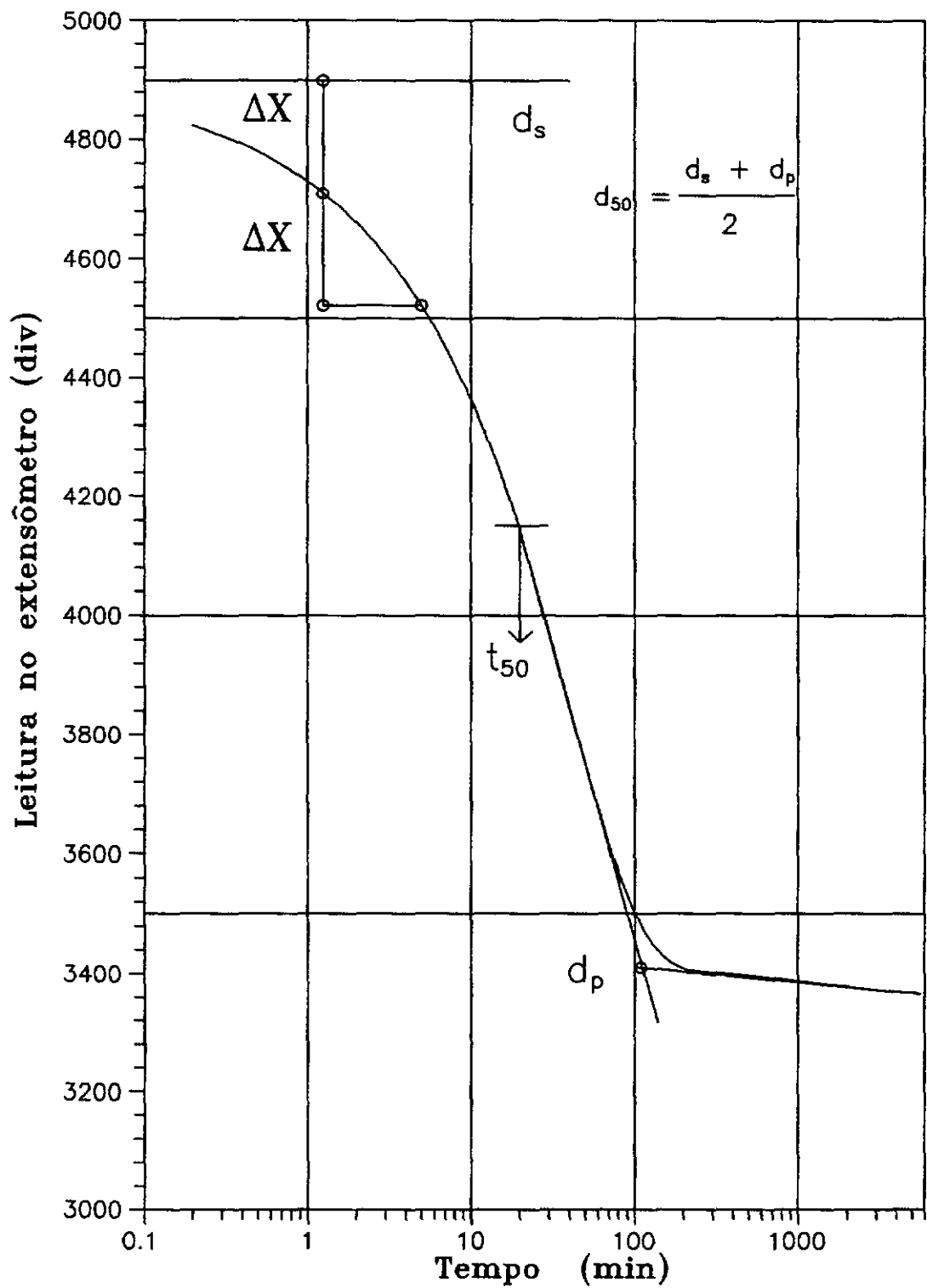


Figura 2.6 - Método de Casagrande.

número discreto de pontos da curva **deformação : tempo** obtida no ensaio incremental, o que pode produzir diferenças dependendo de quem interpreta o ensaio; e também a influência da compressão secundária, visto ser este efeito mais pronunciado na fase final do adensamento primário, uma vez que dependendo do tipo de solo pode ocorrer uma significativa superposição do adensamento primário com a compressão secundária.

As imperfeições decorrentes da utilização do método de Taylor referem-se à não correção do efeito da compressão secundária, e o bom desempenho do método de Casagrande depende da determinação do ponto inicial do adensamento.

Uma desvantagem adicional se deve ao fato de ambos os métodos serem de construção gráfica o que torna difícil a utilização de processos automatizados para o seu emprego (Parkin, 1981).

A despeito destes inconvenientes estes dois métodos são os mais usados, sendo apresentado por Ladd e outros (1977) uma preferência pelo método de Casagrande. Não obstante essas preferências, outros métodos proposto na literatura serão apresentados abaixo.

II.5.2 - MÉTODO DE SCOTT.

II.5.2.1 - INTRODUÇÃO.

O método proposto por Scott (1961) pode ser aplicado a solos em que as hipóteses de Terzaghi (1925) possam ser admitidas como verdadeiras, ou seja, pode-se aplicar a equação (2.2), para descrever o comportamento do solo.

A solução da equação (2.2) em termos do grau de adensamento médio, é dada pela equação abaixo

$$U = 1 - \sum_{m=0}^{\infty} \phi(M) \exp(-M^2 T_v) \quad (2.7)$$

onde $\phi(M)$ depende da distribuição do excesso de poro pressão e $M = (2m + 1)\pi/2$.

Da equação (2.7) tem-se que, para uma dada função $\phi(M)$, U é função exclusivamente do fator tempo, T_v , ou seja:

$$U(T_v) = f(T_v) \quad (2.8)$$

Por outro lado, o grau de adensamento médio também pode ser expresso por:

$$U(T_v) = \frac{d_s - d_t}{d_s - d_p} \quad (2.9)$$

onde :

d_s é a leitura corrigida no extensômetro ao tempo $t = 0$,

d_t é a leitura no extensômetro a um tempo t qualquer,

d_p é a leitura no extensômetro ao final do adensamento primário.

Neste método, a determinação do coeficiente de adensamento, c_v , é efetuada utilizando-se um índice, não sendo necessária a realização de leituras contínuas durante todo o ensaio. Este índice definido por

$$R_c = \frac{U(T_v)}{U(NT_v)} = \frac{f(T_v)}{f(NT_v)} = \frac{d_s - d_t}{d_s - d_{Nt}} \quad (2.10)$$

é chamado de Razão de Compressão, R_c , o qual ocorre a diferentes tempos.

Para a determinação da Razão de Compressão é necessário que se conheçam as leituras de deformação d_t e d_{Nt} , nos respectivos tempos t e Nt , onde N é um número maior do que 1 (preferencialmente um inteiro) e a leitura de deformação inicial corrigida d_s , para $t = 0$.

II.5.2.2 - PROCEDIMENTO GRÁFICO.

O gráfico Razão de Compressão : Fator Tempo, apresentado por Scott (1961) foi aqui construído, conforme apresentado na figura 2.7. Para tal foi considerada uma distribuição uniforme do excesso de poro pressão, ou seja,

$\phi(M) = 2/M^2$. As tabelas do Apêndice A apresentam os valores da Razão de Compressão em função do Fator Tempo para vários valores de N . Na construção deste gráfico, utilizam-se as equações (2.7) e (2.10) atribuindo-se valores convenientes a N . Com a equação (2.7) determina-se $U(T_v)$, e com o valor de N adotado e a equação (2.7) calcula-se $U(NT_v)$. Com estes dois valores determina-se a Razão de Compressão pelo lado esquerdo da equação (2.10).

O ábaco da figura 2.7 é construído marcando-se, para cada valor fixo de N , os pares de pontos Razão de Compressão e Fator Tempo.

Para $N = \infty$, a Razão de Compressão se reduz a $U(T_v)$, que também deve ser traçado no ábaco da figura 2.7, e esta será a curva do Grau de adensamento médio : Fator Tempo.

O cálculo do coeficiente de adensamento por meio deste método é feito determinando-se primeiramente a leitura inicial corrigida, d_g , ao tempo $t = 0$, e observando-se duas leituras de deformação d_t e d_{Nt} , nos respectivos tempos t e Nt . Substituindo então estes valores na equação (2.10), obtém-se a Razão de Compressão. No ábaco da figura 2.7, com os valores da Razão de Compressão e N determina-se o valor do Fator Tempo, T_v , correspondente. De posse dos valores de t , H_d e T_v o valor do coeficiente de adensamento pode ser obtido através da equação

$$c_v = \frac{T_v H_d^2}{t} \quad (2.11)$$

A determinação de c_v pode ser feita a diferentes tempos e para diferentes valores de N , o que produzirá um conjunto de valores de c_v . O valor de c_v a ser adotado, pode ser tomado ou pela média aritmética dos valores obtidos, ou como apresentado a seguir.

Uma variação do valor de d_g resulta em uma maior variação do coeficiente de adensamento para os primeiros tempos de ensaio do que para tempos posteriores. Com isto, o critério de escolha ou cálculo de d_g deve ser tal que os valores de c_v obtidos para pequenos valores de N estejam em

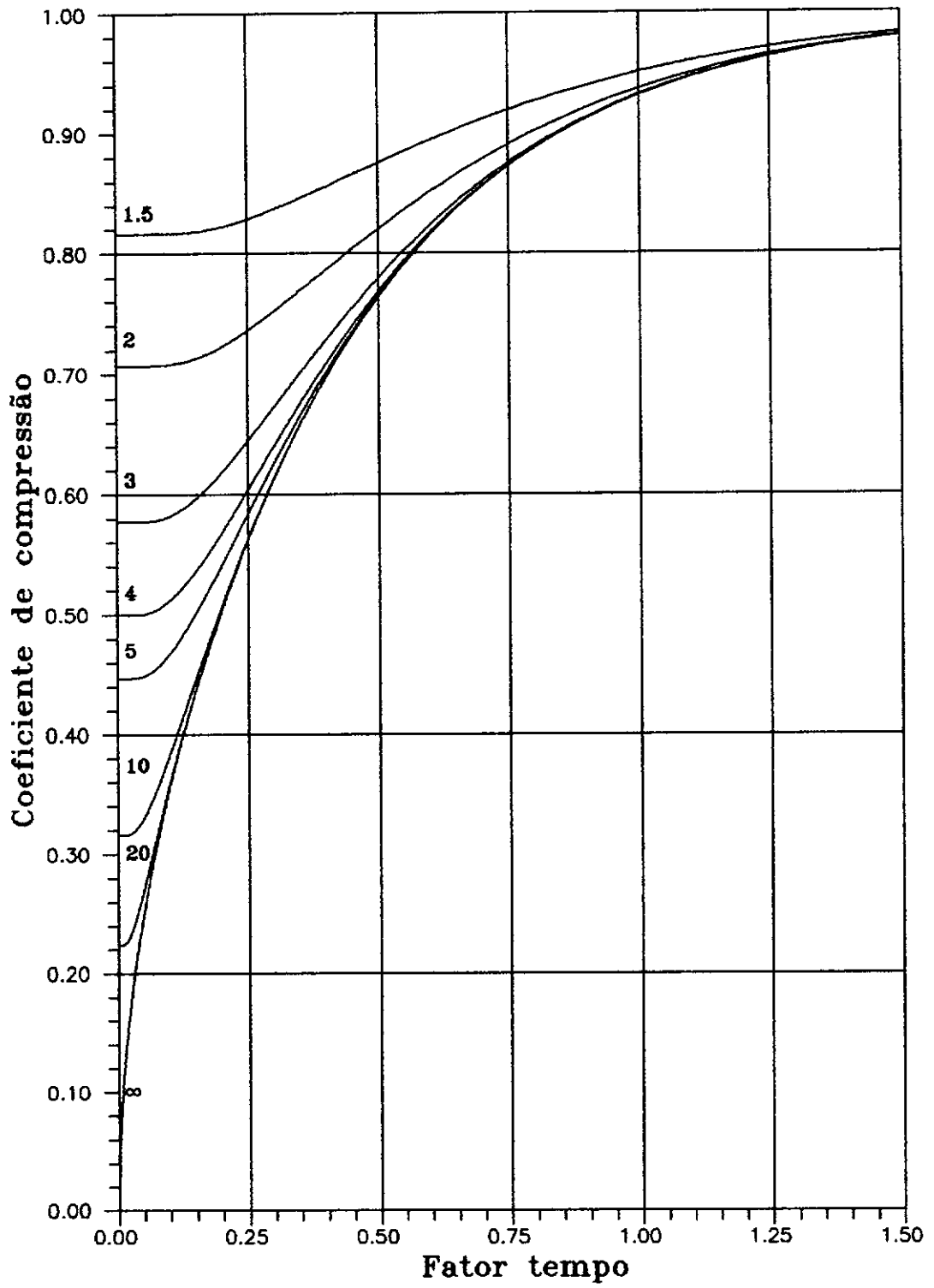


Figura 2.7 - Método de Scott - Razão de Compressão : Fator Tempo

consonância com os valores obtidos com maiores valores de N . Portanto, se os coeficientes de adensamento calculados à pequenos tempos são maiores que para tempos subsequentes, uma redução de d_g deve ser efetuada, ou vice-versa.

Exemplos numéricos da aplicação do método de Scott são apresentados no item II.6.

II.5.2.3 - VANTAGENS E DESVANTAGENS.

Para utilização deste método, não é mais necessário que se façam leituras contínuas de deformação, o que constitui uma vantagem. Uma vantagem adicional é o fato deste método poder ser também aplicado a problemas de fluxo radial para o qual utilizam-se equações similares às acima. Este método tem sido também aplicado para a determinação de coeficientes de adensamento de campo a partir de medições de recalques (Almeida e outros, 1989).

Sua principal desvantagem está na necessidade de correção dos valores iniciais da curva de deformação : tempo. Uma desvantagem adicional se encontra no fato deste método utilizar em geral os gráficos apresentados por Scott, o que representa perda de acurácia dos valores obtidos. Entretanto quando são utilizados valores numéricos calculados diretamente pelas equações, como aqui, esta desvantagem desaparece.

II.5.3 - MÉTODO DE SU.

Su (1958) apresenta um método em que o coeficiente de adensamento é determinado utilizando-se a tangente máxima da curva de deformação : $\log t$. Ainda que este método seja pouco utilizado e divulgado na literatura, resolveu-se testar a sua aplicabilidade neste trabalho.

Este método é aplicado quando se pode admitir que uma amostra de solo ao ser solicitada por um acréscimo de tensão se comporte segundo o processo de adensamento proposto por Terzaghi.

Partindo da definição do grau médio de adensamento, um outro índice pode ser definido, e aqui chamado de **Índice de Adensamento Residual**, R , sendo dado por:

$$R = 1 - U(T_v) = \sum_{m=0}^{\infty} \phi(M) \exp(-M^2 T_v) \quad (2.12)$$

A expressão que define a tangente à curva $R \times \log T_v$ é:

$$\frac{\partial R}{\partial (\log T_v)} = \frac{T_v}{0,4343} \frac{\partial R}{\partial T_v} = - \sum_{m=0}^{\infty} \frac{\phi(M) M^2 T_v}{0,4343} \exp(-M^2 T_v) \quad (2.13)$$

A condição do ponto de inflexão, ou seja, o ponto de maior tangente é dado por :

$$\frac{\partial^2 R}{\partial (\log T_v)^2} = 0 \quad (2.14)$$

Deste modo:

$$\sum_{m=0}^{\infty} \frac{\phi(M) M^2}{0,4343} \exp(-M^2 T_v) (1 - M^2 T_v) = 0 \quad (2.15)$$

Com esta equação tem-se:

$$T_v = 0,404 \quad e$$

$$R = 0,298$$

Admitindo $\phi(M) = 2/M^2$, (distribuição uniforme do excesso de poro pressão ao longo da espessura da camada de solo) e substituindo o valor de T_v na equação (2.13) chega-se a:

$$S = \left. \frac{\partial R}{\partial (\log T_v)} \right|_{T_v = 0.404} = 0.688 \quad (2.16)$$

onde S é a inclinação da tangente de máxima inclinação.

Considerando uma relação entre a deformação e o

logarítmo do tempo, Su obteve uma expressão que fornece a leitura do extensômetro (ou índice de vazios) para qualquer grau de adensamento médio, U. Esta relação é dada por:

$$d_U = d_s - \frac{h_T U}{S} \quad (2.17)$$

onde:

d_s é a leitura inicial corrigida no extensômetro como proposto por Casagrande, e

h_T é a diferença dos intercêptos da linha de máxima tangente para um ciclo de $\log t$, como mostrado na figura 2.8.

Os valores de U acima devem ser menores que 0,9 para se minimizar os efeitos da compressão secundária.

II.5.3.1 - DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE ADENSAMENTO.

O coeficiente de adensamento pode ser determinado seguindo-se os seguintes passos:

- 1) Traçar uma curva com as leituras de deformação : tempo em um gráfico semilogarítmo, figura 2.8.
- 2) Determinar a leitura inicial corrigida, d_s .
- 3) Traçar uma tangente TT pelo ponto de inflexão da curva do item 3;
- 4) Determinar h_T como apresentado na figura 2.8.
- 5) Calcular d_U pela equação (2.17), para um dado grau de adensamento médio U.
- 6) Determinar através da curva do item 1) o tempo t_U correspondente à d_U .
- 7) Com os valores de T_v , H_d e t_U , calcular c_v pela equação (2.11).

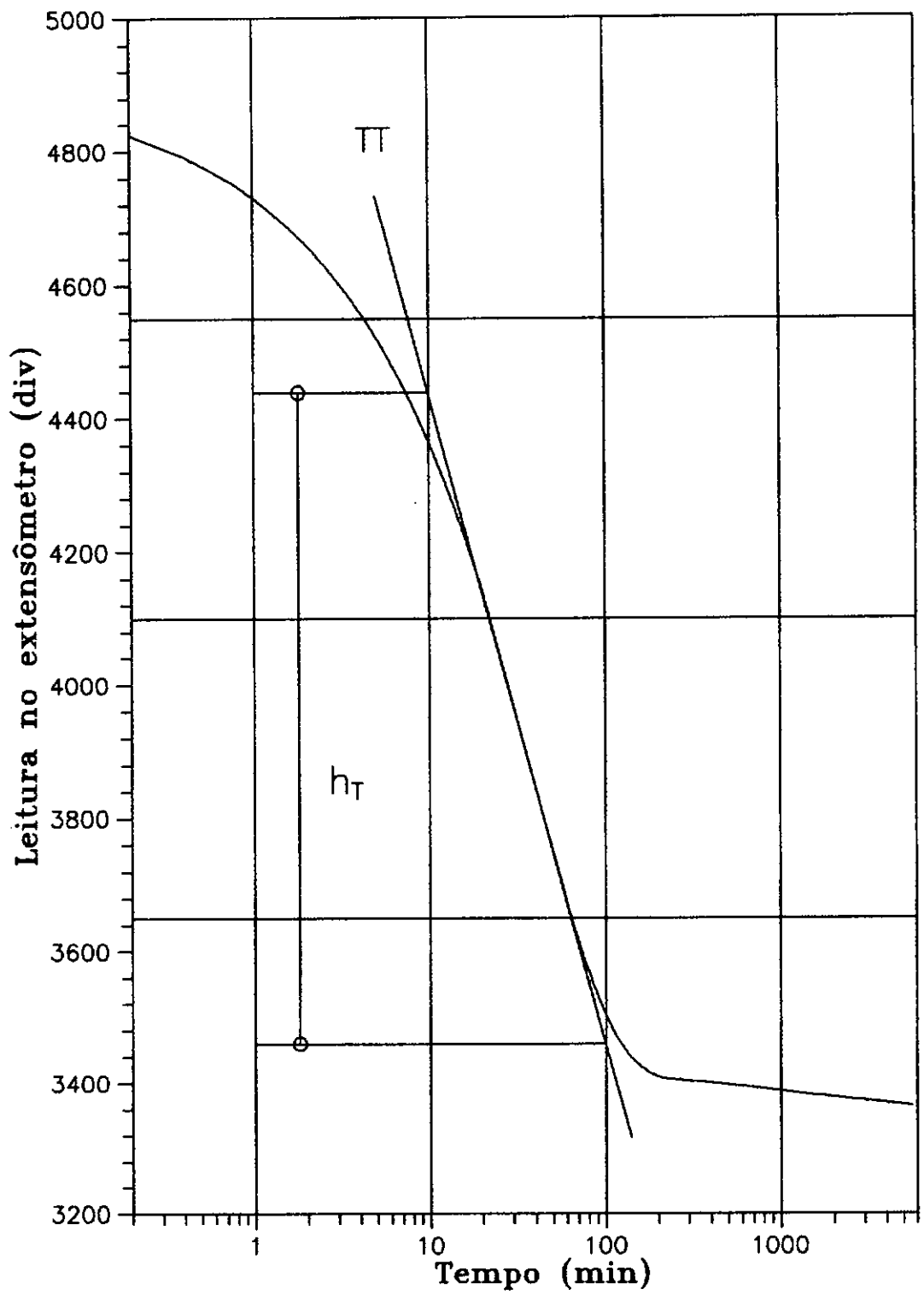


Figura 2.6 - Método de Su.

Um exemplo de aplicação do método de Su é apresentado pela tabela 2.2 para o ensaio I2.

Tabela 2.2 - Exemplo de aplicação do método de Su.

$$\begin{aligned}\sigma'_v &= 20 \text{ kPa} & h_T &= 77 \text{ div} \\ 2H_d &= 2,683 \text{ cm} & d_s &= 2050 \text{ div}\end{aligned}$$

T_v	U	d_u (div)	t_u (min)	c_v
0.126	0.4	2005	9,6	1,244
0.197	0.5	1994	15,0	1,245
0.287	0.6	1983	21,5	1,265
0.403	0.7	1972	30,0	1,273
c_v médio (m^2/ano)				1,257

II.5.3.2 - COMENTÁRIOS.

Este método se mostra vantajoso para aplicação principalmente quando as curvas de deformação versus $\log t$ não apresentam a forma de "S", como acontece nas curvas tipos II e III referidas por Leonards e Altschaeffl (1964), ou quando o efeito da compressão secundária não é de interesse, uma vez que neste método só se consideram valores de deformação para $U < 0,9$.

II.5.4 - MÉTODO DA VELOCIDADE OU MÉTODO DE PARKIN.

II.5.4.1 - INTRODUÇÃO.

O método de Parkin (1978), tem como principal característica, eliminar as construções gráficas tais como a correcção da deformação inicial do corpo de prova e a

determinação do fim do adensamento primário no gráfico $\log t$ de Casagrande.

Este método se fundamenta em comparar a velocidade de adensamento representada no gráfico $\log(\text{velocidade de deformação}) : \log(\text{tempo})$, curva experimental figura 2.9, e $\log(dU/dT_v) : \log(T_v)$, curva teórica figura 2.10. Nesta representação, a curva do gráfico $\log(dU/dT_v) : \log(T_v)$ apresenta, na fase linear inicial, uma inclinação de 1:2 (como mostrado na figura 2.10) e que após esta fase, a inclinação cresce continuamente até um valor ∞ . Esta comparação se faz superpondo as duas figuras acima citadas. Para se fazer esta superposição é necessário que as escalas logarítmicas dos eixos de ambos os gráficos sejam iguais, ou seja, ciclos de mesmo comprimento em ambos os eixos nos dois gráficos.

Com a utilização do gráfico bi-logarítmico da velocidade de deformação : tempo pode-se ter uma ideia de quanto o solo se afasta da teoria de adensamento de Terzaghi. O desvio da fase final da curva experimental em relação a curva teórica representa o maior ou menor efeito da compressão secundária, uma vez que quanto mais horizontal for a fase final da curva maior será o efeito da compressão secundária (Parkin, 1981; Parkin e Lun, 1984 e Lun and Parkin, 1985).

II.5.4.2 - PROCEDIMENTO.

A determinação de c_v é feita traçando-se a curva $\log(\text{velocidade de deformação}) : \log(\text{tempo})$ e a curva teórica $\log(dU/dT_v) : \log(T_v)$. Para o traçado da curva teórica deve-se utilizar papel transparente. Superpondo-se a curva teórica à experimental, de tal forma que as duas curvas se tornem o mais coincidente possível. Sobre este trecho coincidente das duas curvas, determina-se um valor de T_v na curva teórica, e o respectivo valor de t na curva experimental. Com os valores de T_v , t e H_d calcula-se c_v pela equação (2.11).

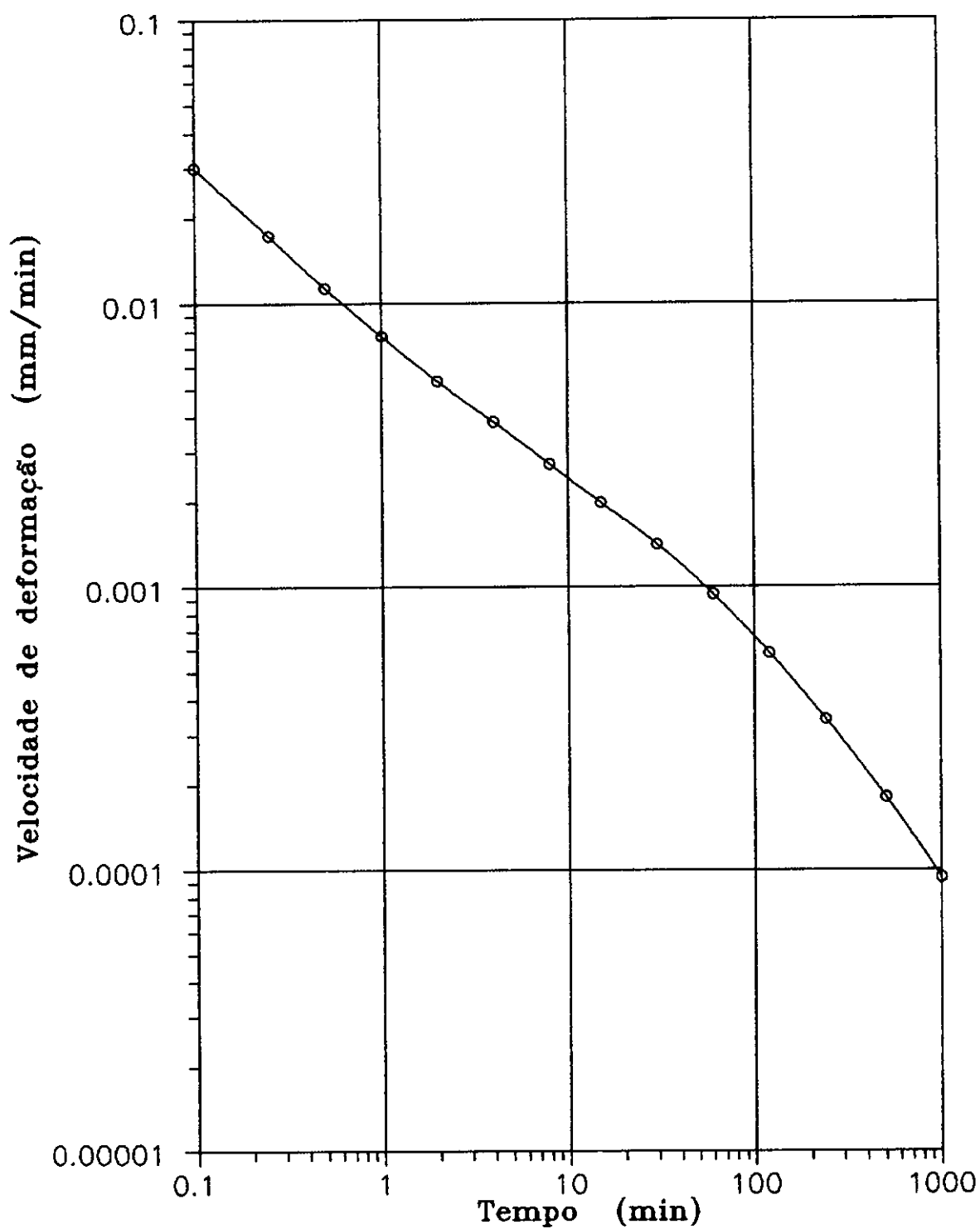


Figura 2.9 - Método de Parkin - $\log(\text{velocidade de deformação}) : \log(\text{tempo})$.

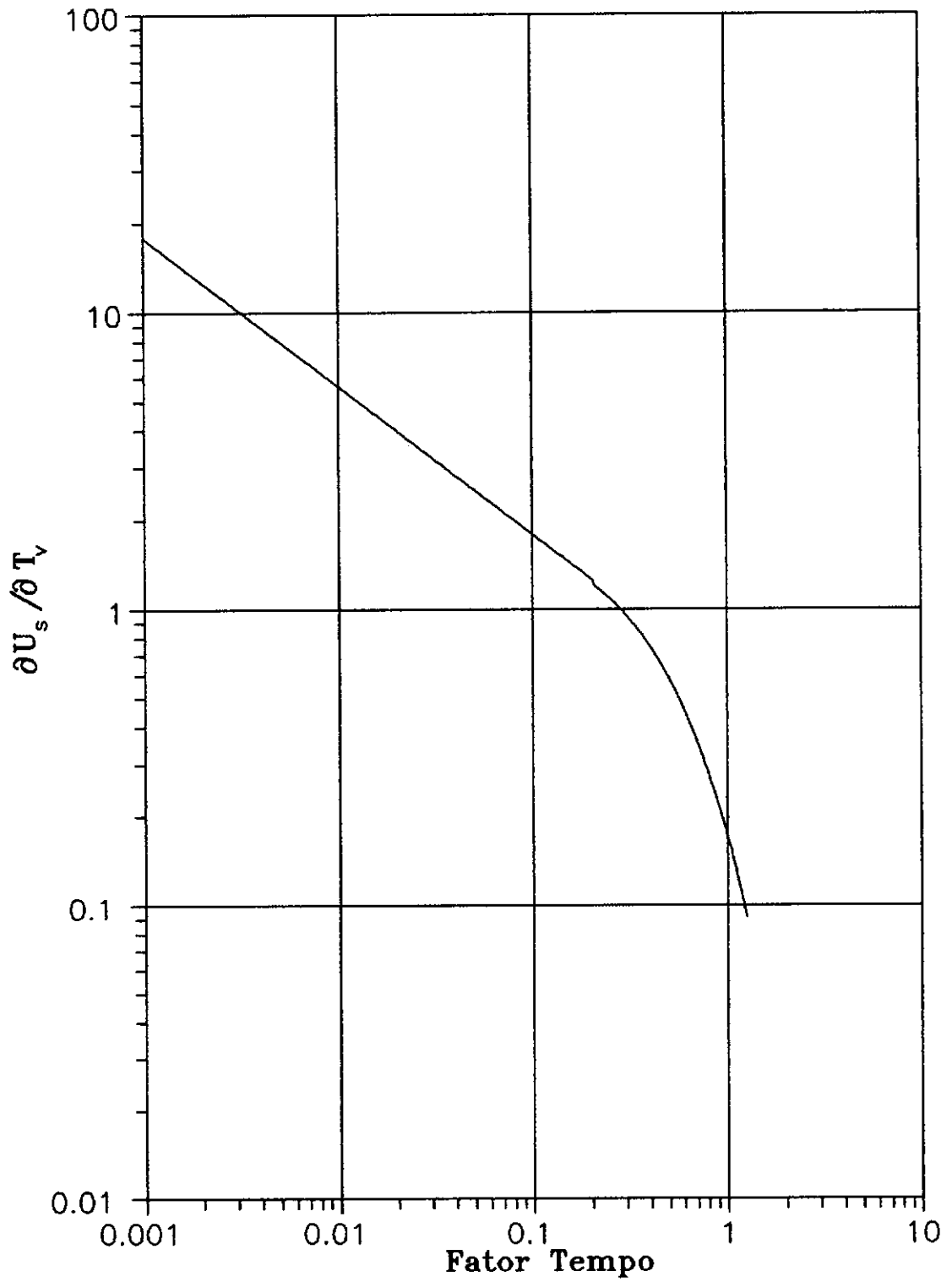


Figura 2.10 - Método de Parkin - $\log(dU/dT_v) : \log(T_v)$.

Um exemplo de utilização do método de Parkin é apresentado abaixo.

A figura 2.9 representa a curva $\log(\text{velocidade de deformação}) : \log(\text{tempo})$ para o ensaio I2 para a pressão de adensamento de 160 kPa. Pela superposição dos gráficos das figuras 2.9 e 2.10 tem-se $T_v = 0,285$, $t = 45 \text{ min}$, $H_d = 0,830 \text{ cm}$, e substituindo-se na equação (2.11) tem-se $c_v = 0,227 \text{ m}^2/\text{ano}$.

II.5.5 - OUTROS MÉTODOS.

Os métodos apresentados acima são os mais citados na literatura, e dentre eles os mais conhecidos são os métodos de Casagrande e de Taylor. Além destes métodos pode-se citar outros como o método de Christensen e Wu (1964); Wu, Resendi e Neukirchen (1966); Sivaram e Swamee (1977); Asaoka (1978) e Rao e Kodandaramaswamy (1982).

O método de Asaoka tem sido empregado (e. g. Terra, 1988) em obras em que se tenha o controle de recalques por meio de instrumentação de campo.

II.6 - APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.

O programa de ensaios consistiu de ensaios preliminares e de ensaios definitivos. Foram realizados nove ensaios preliminares em amostras de nove profundidades, os quais não foram utilizados nesta dissertação tendo em vista a má qualidade das amostras. Estes ensaios serviram entretanto, para se ganhar experiência com a execução dos ensaios. O programa de ensaios definitivos consistiu de cinco ensaios, sendo que um desses, profundidade de 7,00 a 7,50 m, não foi satisfatório não sendo portanto aqui utilizado. A tabela 2.3 lista as profundidades dos ensaios incrementais a serem apresentados a seguir.

Tabela 2.3 - Ensaio de adensamento incremental realizados

Ensaio	Profundidade (m)
I1	2,00 a 2,50
I2	2,50 a 3,00
I3	4,00 a 4,50
I4	5,00 a 5,50

II.6.1 - CURVA ÍNDICE DE VAZIOS VERSUS TENSÃO EFETIVA VERTICAL.

A tabela 2.4 relaciona algumas características da argila do Sarapuí encontradas pelo autor, profundidade de 5,00 a 5,50 m, com as encontradas por Coutinho (1976) em amostra de boa qualidade em profundidades próximas, 5,50 a 6,00 m. A figura 2.11 apresenta uma comparação de curvas $e : \log \sigma'_v$ para as mesmas amostras. As amostras AV3-5 e AV11-5 de Coutinho (1976), foram escolhidas para comparação por representarem as amostras de maior e menor índice de vazios respectivamente. O valor de C_c encontrado no presente trabalho correspondente a 24 horas de adensamento, está entre os valores encontrados por Coutinho (1976).

As curvas $e : \log \sigma'_v$ ao final de adensamento primário e para adensamento após 24 horas são apresentadas nas figuras 2.12 à 2.15. Como se observa desses gráficos, as curvas $e : \log \sigma'_v$ apresentam o trecho de compressão virgem não linear, o que é esperado para argilas normalmente adensadas, quando as amostras são de boa qualidade. Conforme tendência atual na COPPE (Martins, 1983) apresenta-se também esses resultados no gráfico $\log(1 + e) : \log \sigma'_v$ nas figuras 2.16 à 2.19. Uma grande vantagem na utilização da curva $\log(1 + e) : \log \sigma'_v$ é linearização do trecho de compressão virgem.

Com base nos resultados apresentados, pode-se dizer que a amostra I4 é de boa qualidade e as demais apresentam-se um pouco amolgadas.

Tabela 2.4 - Comparação de algumas características da argila do Sarapuí encontradas no presente trabalho e por Coutinho (1976)

Ensaio	Profundidade (m)	e_o	C_c (80 a 320 kPa)	CR (80 a 320 kPa)	Umidade (%)
AV2-10 ⁽¹⁾	5,50 a 6,00	3,71	1,595	0,337	149,30
AV3-5 ⁽¹⁾	5,50 a 6,00	3,66	1,596	0,341	148,37
AV11-5 ⁽¹⁾	5,50 a 6,00	3,38	1,759	0,390	138,50
AV12-10 ⁽¹⁾	5,50 a 6,00	3,67	1,611	0,353	148,87
I4 ⁽²⁾	5,00 a 5,50	4,04	1,601	0,334	147,13

Nota : (1) Coutinho (1976)

(2) Presente trabalho

○○○○○○ 14 - Presente Trabalho
 □□□□ AV3-5 - Coutinho, 1976
 ◇◇◇◇ AV11-5 - Coutinho, 1976

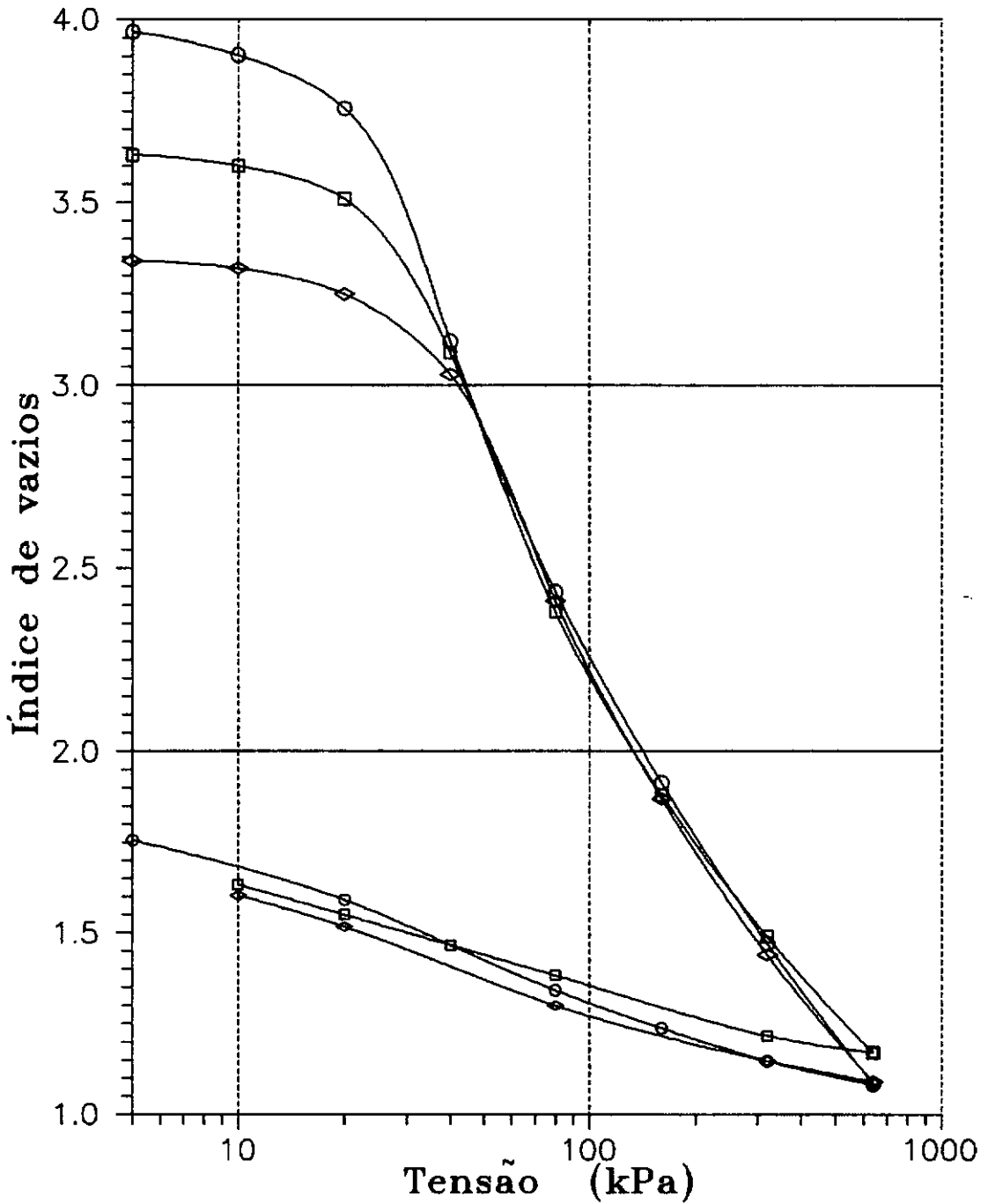


Figura 2.11 - Comparação da curva $e : \log \sigma'_v$ encontrada no presente trabalho e Coutinho (1976) para a argila do Sarapu em profundidades próximas.

ooooo Adensado por 24 horas
 ★★★★★ Final do adensamento primário

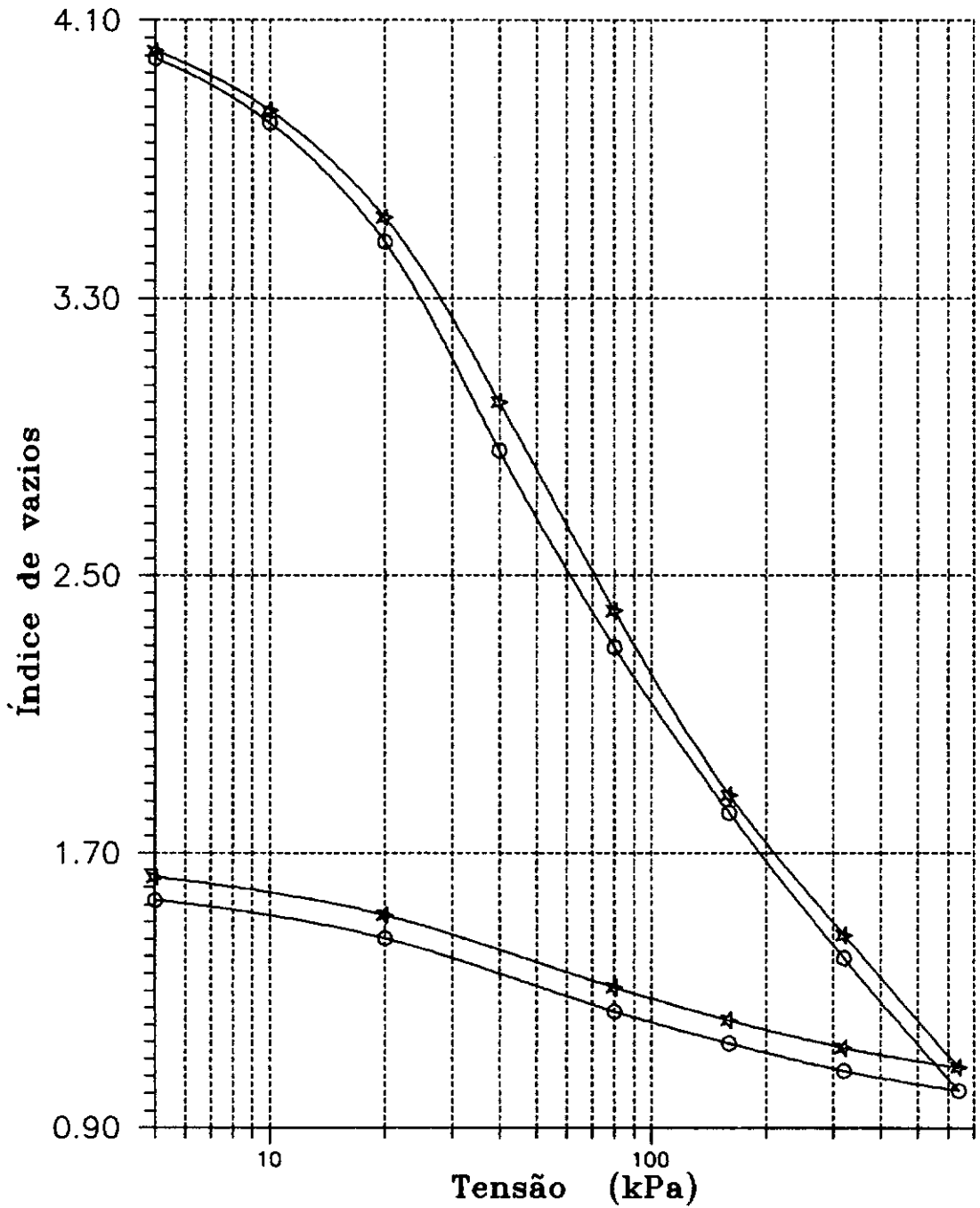


Figura 2.12 - Curva $e : \log \sigma'_v$ - Ensaio I1

ooooo Adensado por 24 horas
 ***** Final do adensamento primário

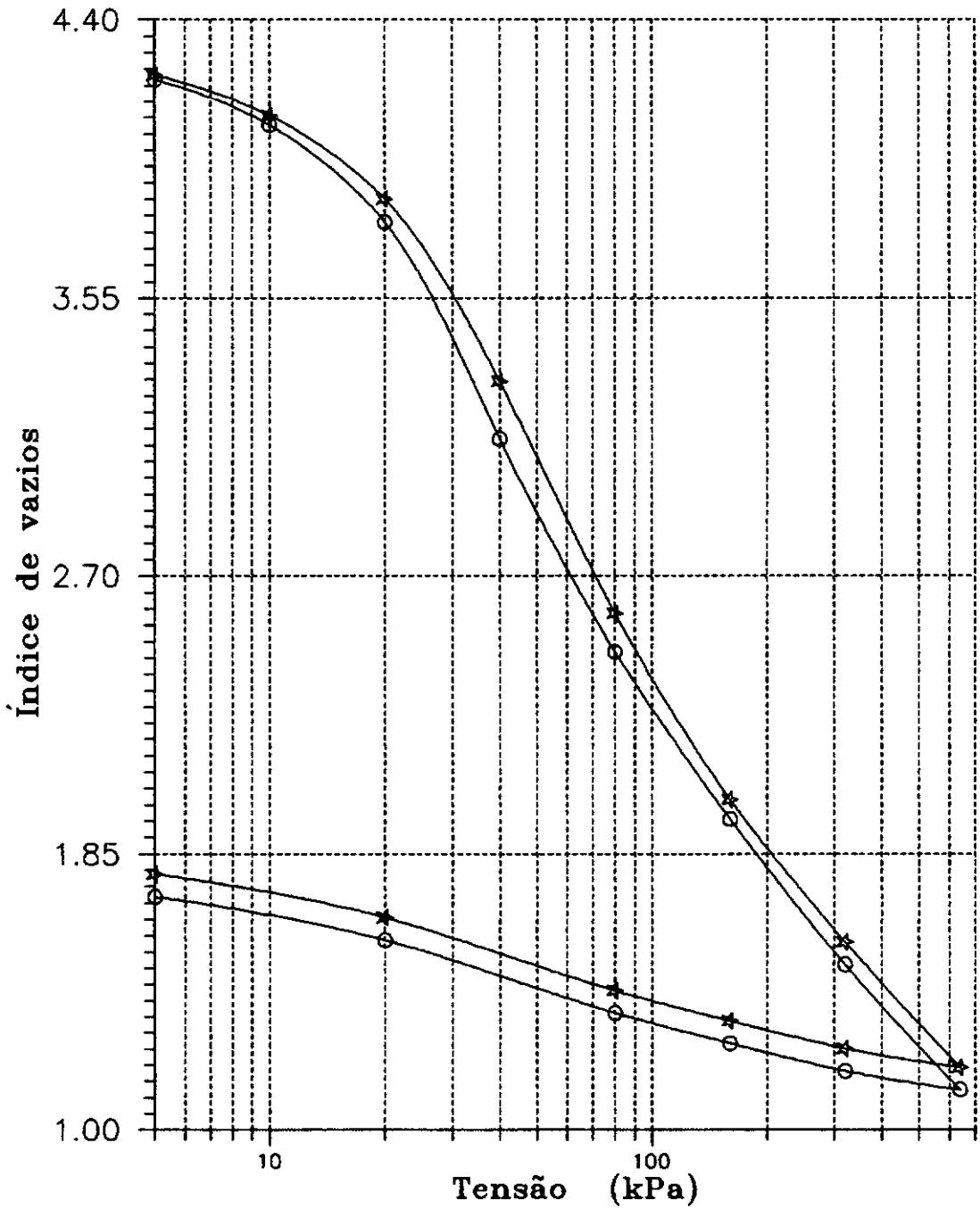


Figura 2.13 - Curva $e : \log \sigma'_v$ - Ensaio I2

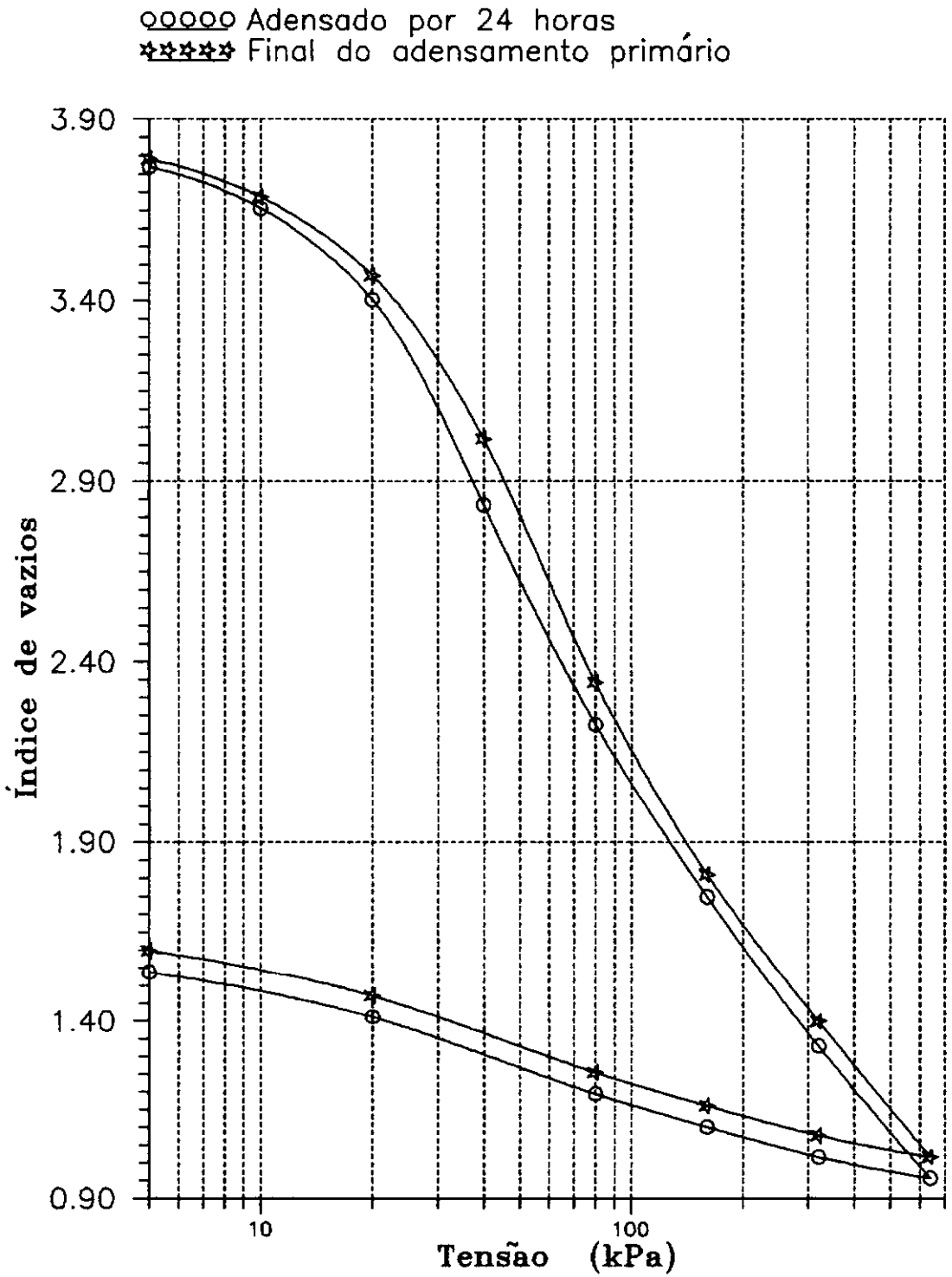


Figura 2.14 - Curva e : $\log \sigma'_v$ - Ensaio I3

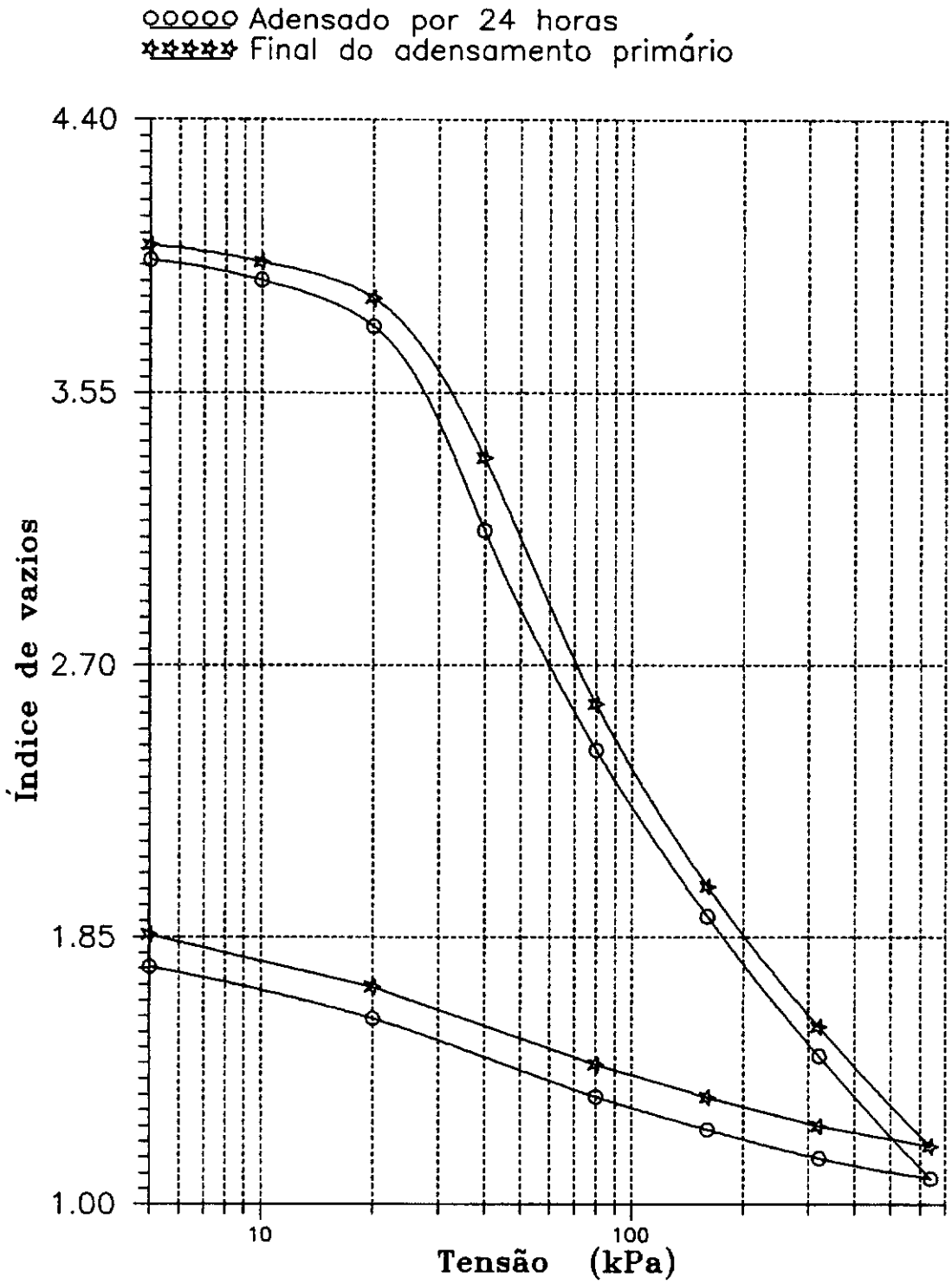


Figura 2.15 - Curva e : $\log \sigma'_v$ - Ensaio I4

○ ○ ○ ○ ○ Adensado por 24 horas
 ☆ ☆ ☆ ☆ ☆ Final do adensamento primário

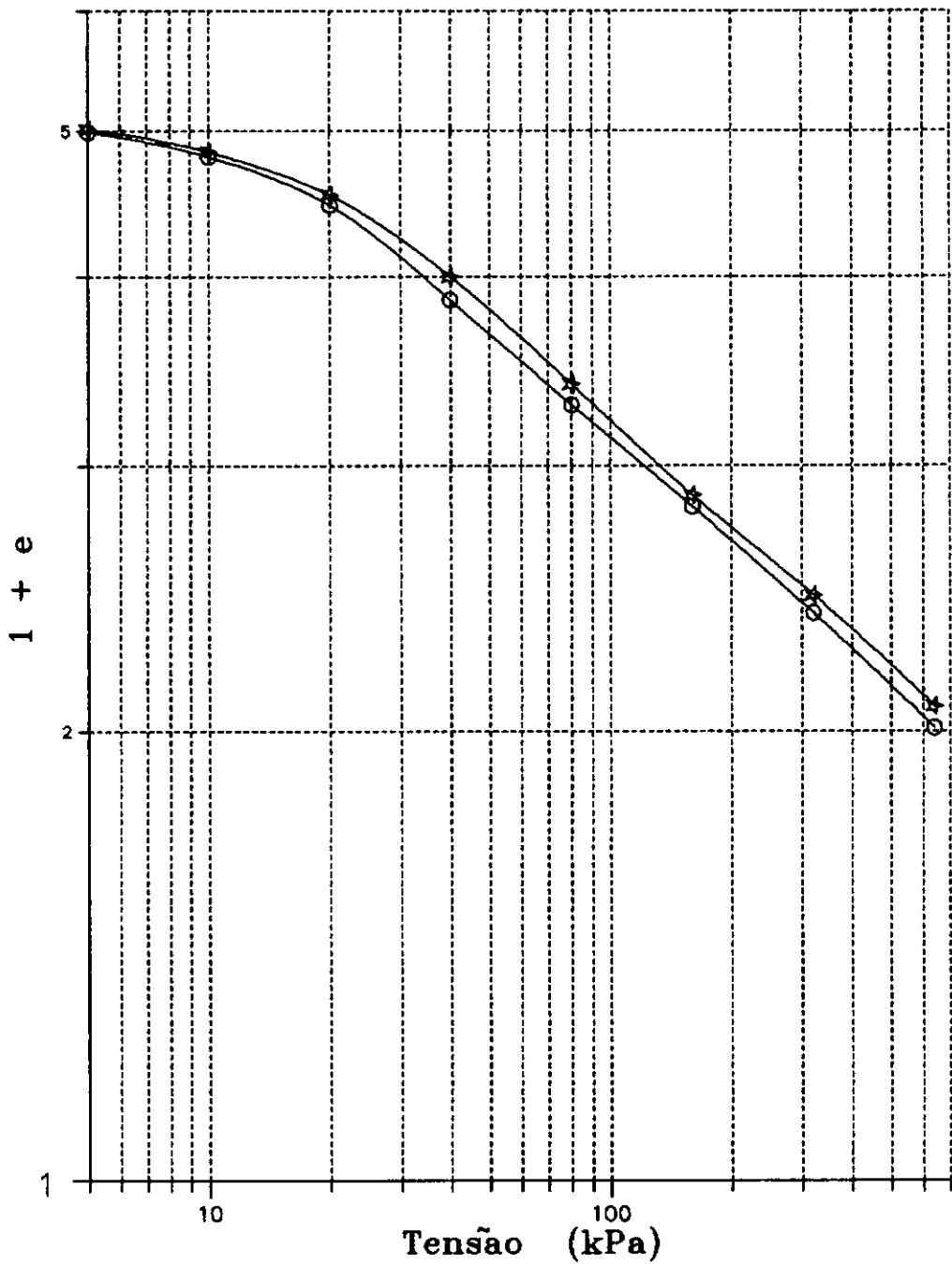


Figura 2.16 - Curva $\log(1 + e) : \log \sigma'_v$ - Ensaio I1

o-o-o-o-o Adensado por 24 horas
 --*-* Final do adensamento primário

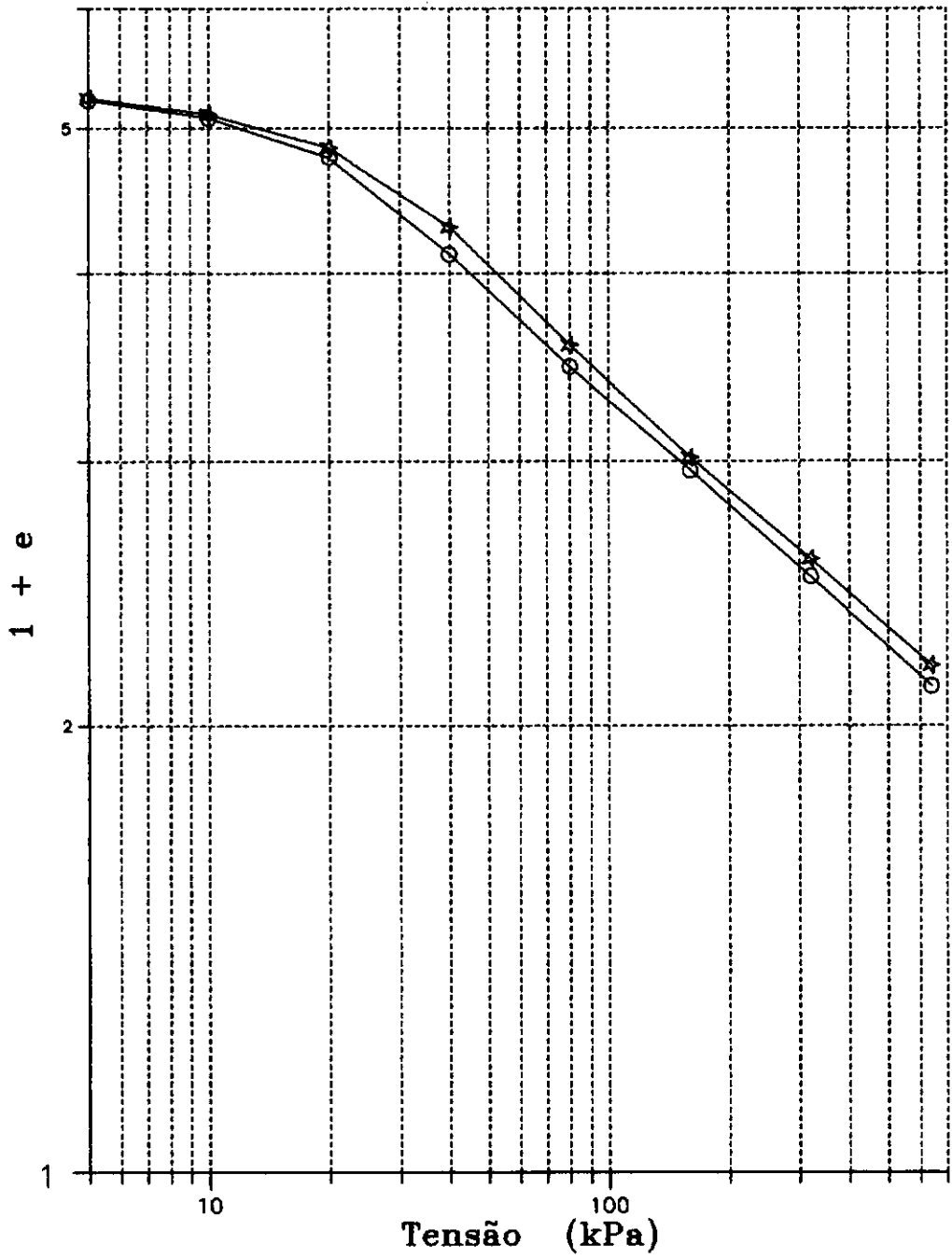


Figura 2.17 - Curva $\log(1 + e) : \log \sigma'_v$ - Ensaio I2

ooooo Adensado por 24 horas
 ***** Final do adensamento primário

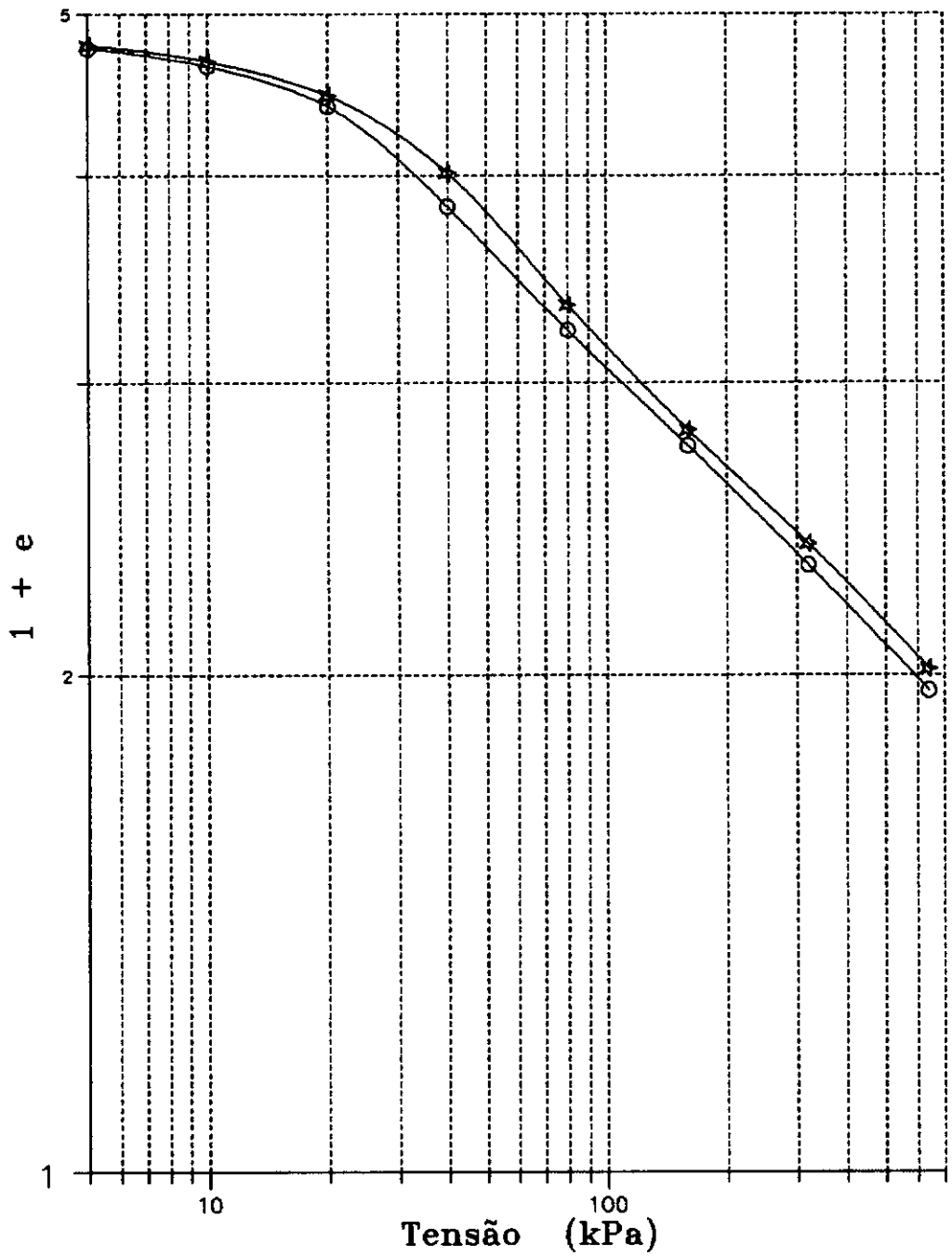


Figura 2.18 - Curva $\log(1 + e) : \log \sigma'_v$ - Ensaio I3

ooooo Adensado por 24 horas
 ***** Final do adensamento primário

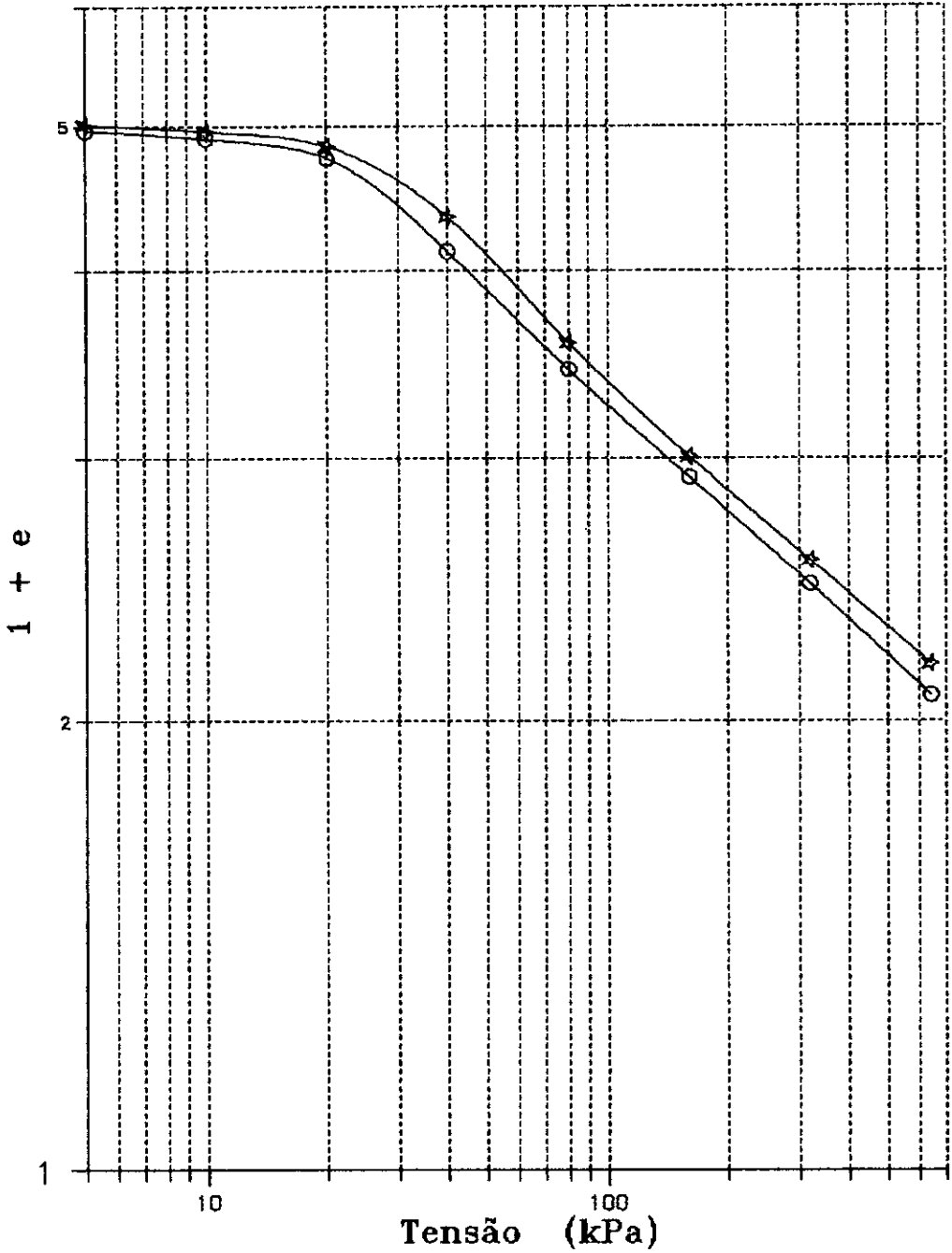


Figura 2.19 - Curva $\log(1 + e) : \log \sigma'_v$ - Ensaio I4

II.6.2 - TENSÃO DE PRÉ-ADENSAMENTO.

Os valores da tensão de pré-adensamento calculados pelos métodos de Casagrande, Pacheco Silva e Pacheco Silva modificado são apresentados nas tabelas 2.5 e 2.6 e nas figuras 2.20 e 2.21.

Como se pode ver pelos resultados apresentados, os valores de tensão de pré-adensamento calculados pelo método de Casagrande estão, em geral, entre os calculados pelos métodos de Pacheco Silva e Pacheco Silva modificado. Contudo os valores obtidos pelo método de Pacheco Silva modificado se apresentam mais próximos aos do método de Casagrande.

As diferenças entre os valores de σ'_{vm} obtidos após 24 horas de adensamento e ao final do adensamento primário, parece aumentar com a profundidade, conforme ilustrado na tabela 2.7 e na figura 2.22, para os valores de σ'_{vm} calculados pelo método de Casagrande.

Tabela 2.5 - Tensão de pré-adensamento ao final do adensamento primário (kPa).

ENSAIO	PACHECO SILVA	CASAGRANDE	PACHECO SILVA MODIFICADO
I1	14,0	17,5	20,5
I2	17,5	19,0	24,0
I3	22,0	26,0	26,0
I4	25,0	26,0	28,0

Tabela 2.6 - Tensão de pré-adensamento após 24 horas de adensamento (kPa).

ENSAIO	PACHECO SILVA	CASAGRANDE	PACHECO SILVA MODIFICADO
I1	13,0	16,0	16,0
I2	15,5	16,5	18,0
I3	18,0	21,0	19,5
I4	20,0	21,0	21,0

Tabela 2.7 - Tensão de pré-adensamento - Método de Casagrande, (kPa).

ENSAIO	24 HORAS DE ADENSAMENTO	ADENSAMENTO PRIMÁRIO
I1	16,0	17,5
I2	16,5	19,0
I3	21,0	26,0
I4	21,0	26,0

***** Pacheco Silva
 44444 Casagrande
 □□□□□ Pacheco Silva modificado

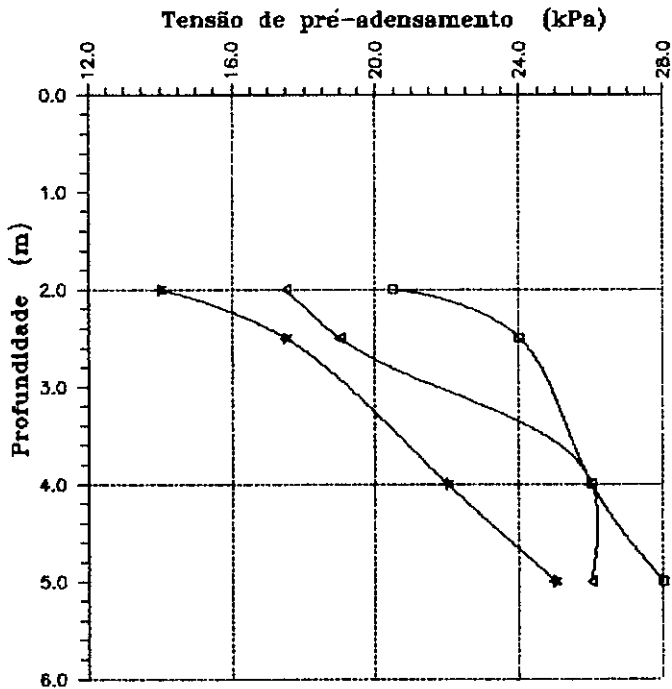


Figura 2.20 - Tensão de pré-adensamento versus profundidade para o final do adensamento primário

***** Pacheco Silva
 44444 Casagrande
 □□□□□ Pacheco Silva modificado

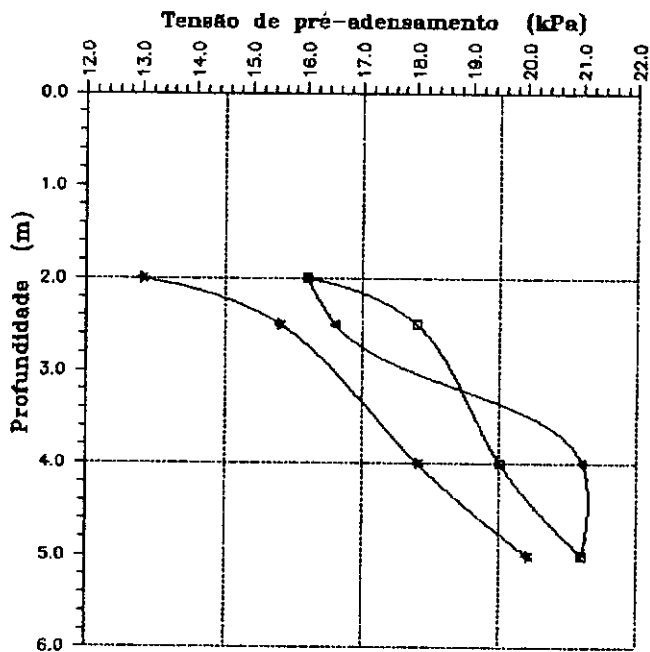


Figura 2.21 - Tensão de pré-adensamento versus Profundidade para 24 horas de adensamento

44444 Adensado por 24 horas
 00000 Final do adensamento primário

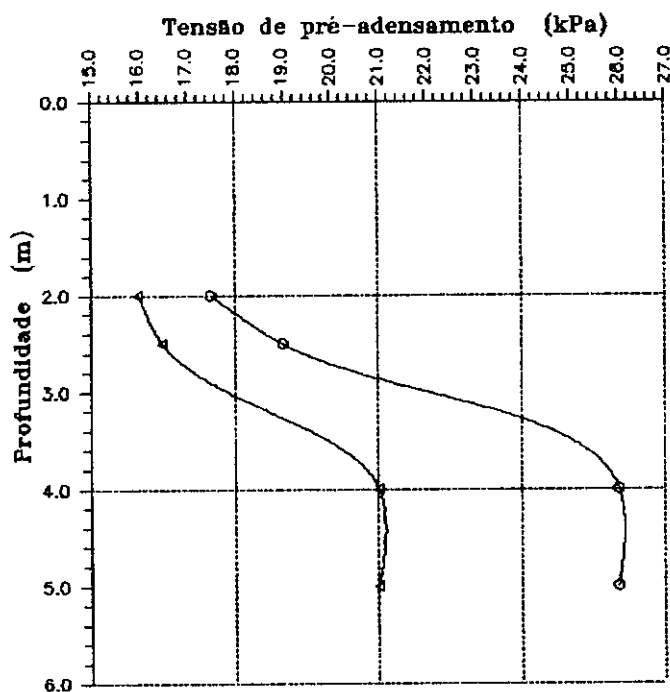


Figura 2.22 - Tensão de pré-adensamento versus profundidade obtida pelo Método de Casagrande.

II.6.3 - COEFICIENTE DE ADENSAMENTO.

Os valores do coeficiente de adensamento estão apresentados na tabelas 2.8 à 2.11 e nas figuras 2.23 à 2.26.

Analisando-se os dados apresentados a seguir pode-se dizer que para valores de tensão menores que a tensão de pré-adensamento, os valores de c_v variam consideravelmente, tendendo a um valor comum para tensões maiores que a tensão de pré-adensamento em todos os métodos.

Comparando-se os resultados do coeficiente de adensamento, calculados pelo método de Casagrande (figura 2.27) e método de Taylor (figura 2.28), do presente trabalho com aqueles apresentados por Coutinho (1976), em profundidades próximas (5,00 a 5,50 e 5,50 a 6,00 m, respectivamente), observa-se uma boa concordância, embora os valores encontrados no presente trabalho sejam

sistematicamente menores.

De uma maneira geral, os valores do coeficiente de adensamento calculados pelos métodos de Taylor e Su apresentam valores maiores que os demais métodos. Este fato, como era de se esperar, ocorre porque em ambos os métodos, o efeito da compressão secundária não é considerado, visto que estes métodos só utilizam o trecho da curva **deformação : tempo** onde o adensamento primário é predominante, $U \leq 0.9$. Por outro lado os valores calculados pelo método de Parkin apresentam os menores valores de c_v , contrariando o comportamento apresentado por Parkin e Lun (1984) e Lun e Parkin (1985).

Em determinadas situações, a utilização do método de Parkin se torna difícil, uma vez que a fase retilínea da curva **velocidade de deformação X tempo** na escala bi-logarítmica não se apresenta com inclinação 1:2, (Parkin, 1978), como por exemplo nos ensaios I1 e I4, além de ser mais trabalhoso que os demais.

Os valores de c_v calculados pelo método de Scott apresentados neste trabalho são a média aritmética dos valores c_v obtidos para os valores de $N = 2, 5, 10, 20, 40$ e 100 . No entanto, foi observado que para pequenos valores de N ($N = 2$ e 5), os valores de c_v são muito maiores que a média dos valores c_v , sendo desprezados no cálculo de c_v médio ao invés de se fazer a correção proposta por Scott (1961), como mostrado na tabela 2.12.

A principal vantagem do método de Scott, de acordo com o autor é o pequeno número de leituras necessárias para a sua utilização. Como este método trabalha com valores discretos de leitura, ele dispensa o acompanhamento do processo de adensamento da amostra, bastando que se faça apenas algumas leituras. Visto que o autor sugere que se faça várias determinações de c_v e considerando-se que para a definição das curvas **deformação : tempo** ou **velocidade de deformação : tempo**, que são empregadas nos demais métodos, não exigem um número muito grande de leituras, geralmente em torno de 16, para o caso de compressão unidimensional, o método de Scott não apresenta grande vantagem.

Tabela 2.8 - Coeficiente de adensamento - Ensaio I1

TENSÃO (kPa)	COEFICIENTE DE ADENSAMENTO (m^2/ano)				
	Casagr.	Taylor	Parkin	Scott	Su
005	1,326	2,753	2,159	1,558	2,214
010	0,751	1,455	0,848	0,901	0,956
020	0,564	0,627	0,335	0,429	0,775
040	0,344	0,374	0,142	0,277	0,432
080	0,238	0,249	0,117	0,185	0,333
160	0,208	0,301	0,150	0,243	0,293
320	0,162	0,252	0,108	0,216	0,235
640	0,184	0,215	0,137	0,207	0,296

Tabela 2.9 - Coeficiente de adensamento - Ensaio I2

TENSÃO (kPa)	COEFICIENTE DE ADENSAMENTO (m^2/ano)				
	Casagr.	Taylor	Parkin	Scott	Su
005	2,019	5,224	0,827	2,142	3,396
010	1,107	2,197	0,582	1,447	2,107
020	1,007	0,962	0,574	0,949	1,257
040	0,407	0,378	0,351	0,355	0,429
080	0,265	0,294	0,299	0,296	0,313
160	0,246	0,346	0,227	0,277	0,427
320	0,239	0,313	0,204	0,266	0,360
640	0,189	0,189	0,200	0,217	0,310

Tabela 2.10 - Coeficiente de adensamento - Ensaio I3

TENSÃO (kPa)	COEFICIENTE DE ADENSAMENTO (m^2/ano)				
	Casagr.	Taylor	Parkin	Scott	Su
005	1,935	4,887	1,130	0,948	1,656
010	1,178	1,381	0,732	0,794	1,685
020	0,729	0,921	0,346	0,481	1,418
040	0,464	0,431	0,256	0,249	0,359
080	0,216	0,196	0,123	0,226	0,236
160	0,194	0,285	0,125	0,205	0,276
320	2,040	0,258	0,090	0,223	0,268
640	1,500	0,232	0,920	0,116	0,220

Tabela 2.11 - Coeficiente de adensamento - Ensaio I4

TENSÃO (kPa)	COEFICIENTE DE ADENSAMENTO (m^2/ano)				
	Casagr.	Taylor	Parkin	Scott	Su
005	3,422	7,651	1,147	3,254	5,530
010	4,002	4,834	1,583	3,312	6,141
020	3,188	1,621	1,138	2,011	2,484
040	0,397	0,423	0,237	0,581	0,498
080	0,252	0,227	0,165	0,186	0,322
160	0,255	0,293	0,105	0,219	0,341
320	0,233	0,218	0,120	0,243	0,176
640	0,208	0,224	0,121	0,211	0,314

- ***** Casagrande
 oooooo Taylor
 ☆☆☆☆☆ Parkin
 ◇◇◇◇◇ Scott
 ▷▷▷▷▷ Su

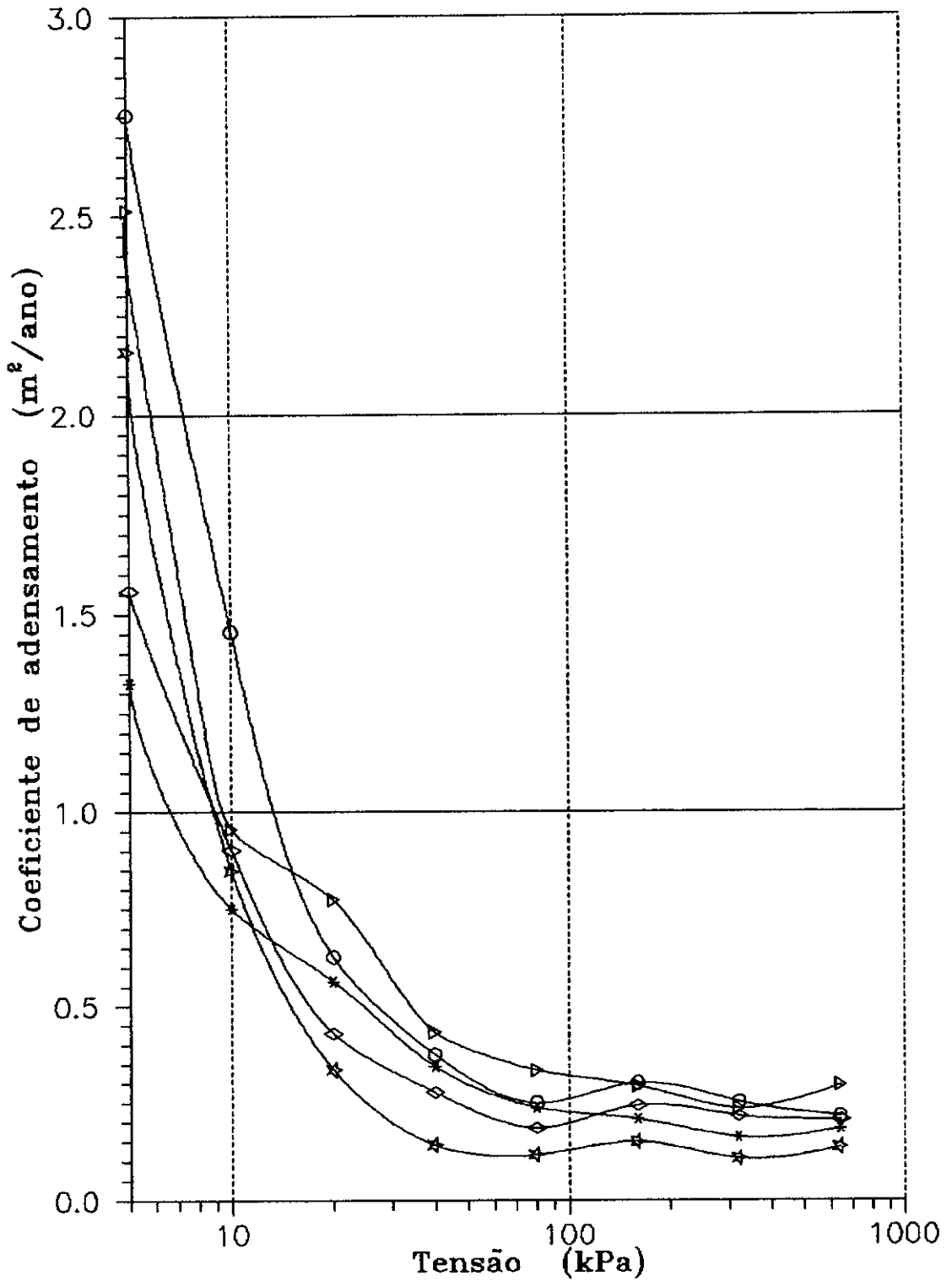


Figura 2.23 - Curva $c_v : \log \sigma'_v$ - Ensaio I1

- ***** Casagrande
 oooooo Taylor
 ☆☆☆☆ Parkin
 ◇◇◇◇◇ Scott
 ▷▷▷▷▷ Su

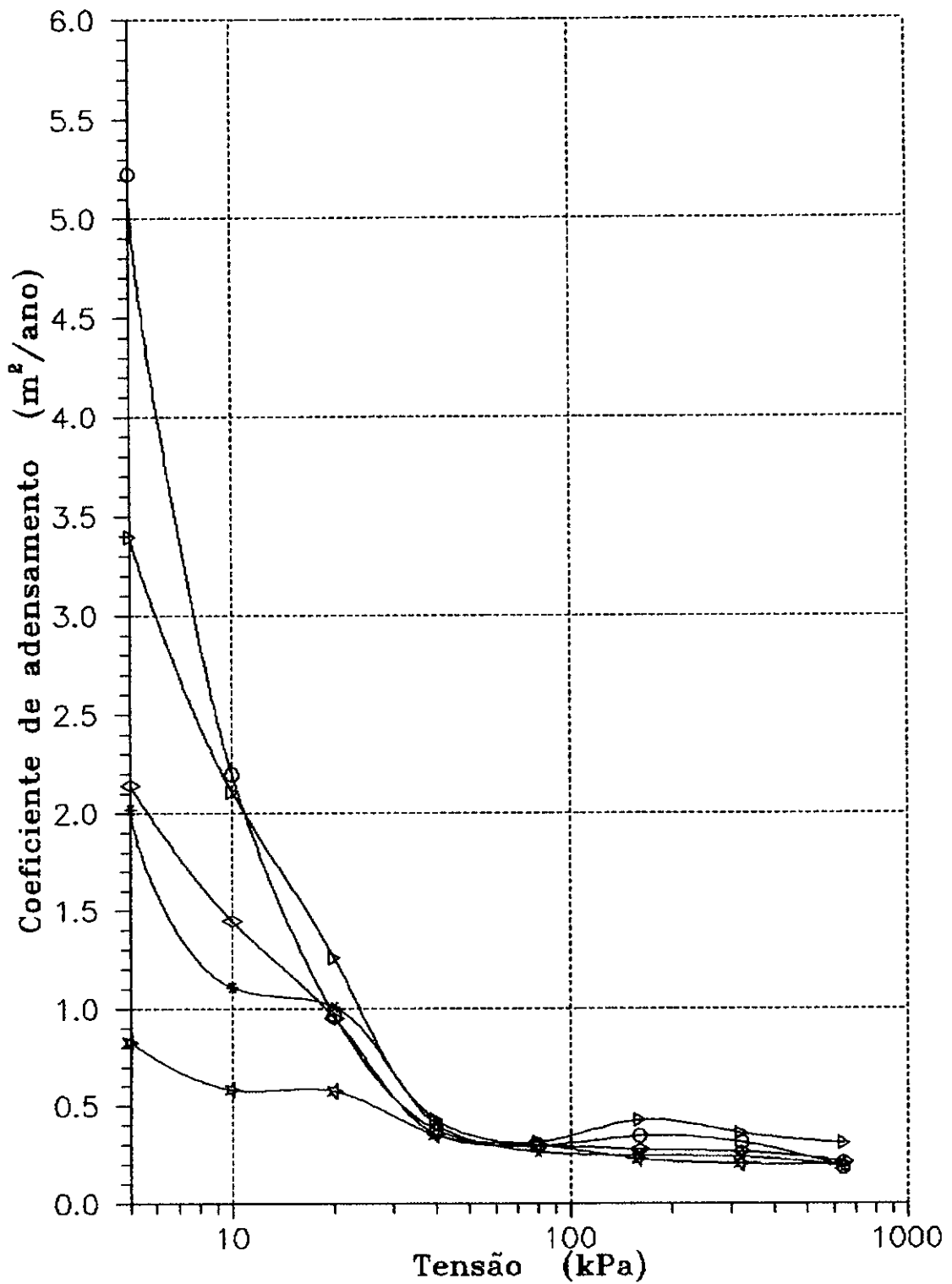


Figura 2.24 - Curva c_v : $\log \sigma'_v$ - Ensaio I2

- * * * * * Casagrande
- o o o o o Taylor
- * * * * * Parkin
- ◇ ◇ ◇ ◇ ◇ Scott
- ▷ ▷ ▷ ▷ ▷ Su

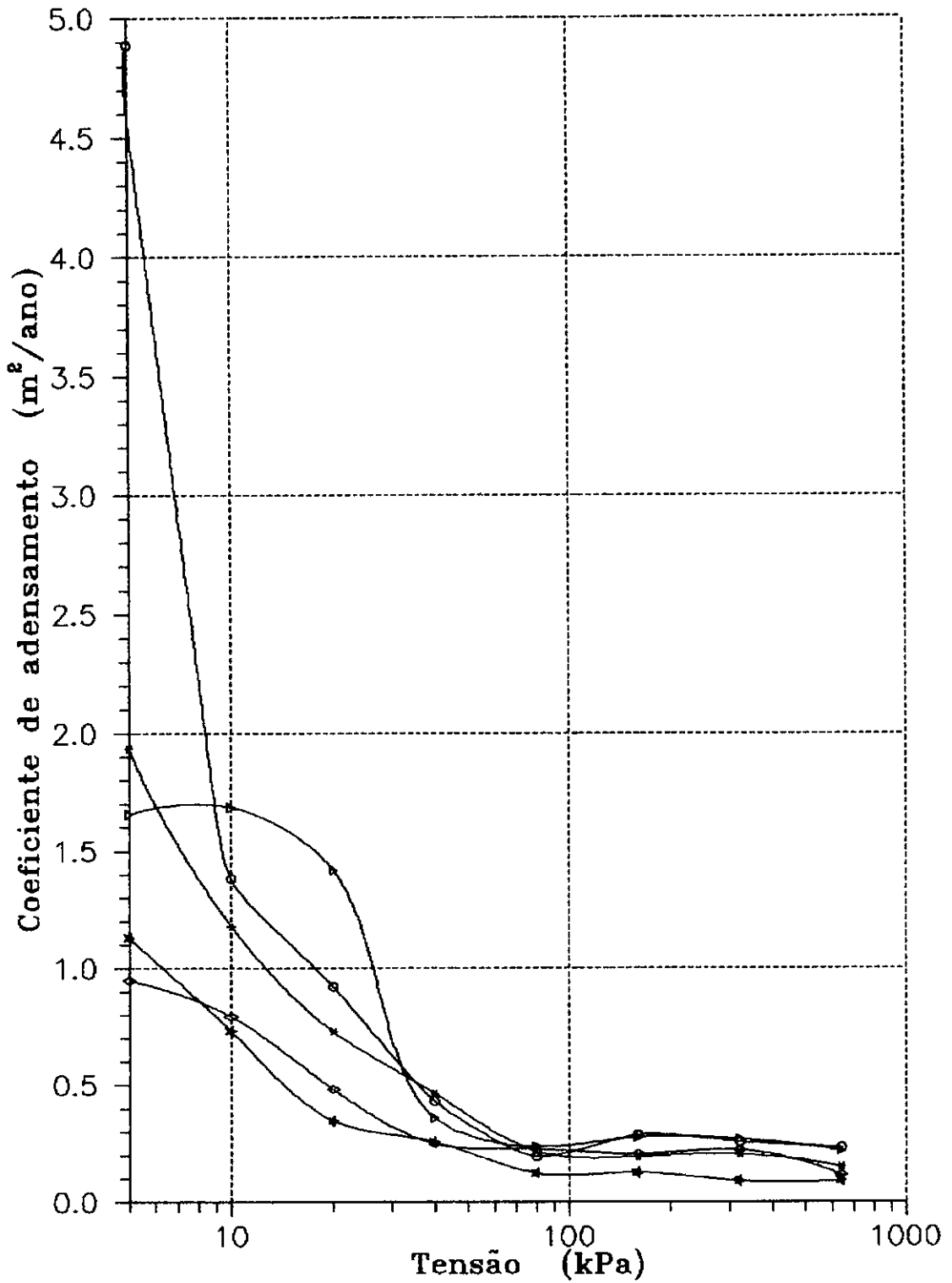


Figura 2.25 - Curva $c_v : \log \sigma'_v$ - Ensaio I3

- * * * * * Casagrande
 o o o o o Taylor
 * * * * * Parkin
 < < < < < Scott
 > > > > > Su

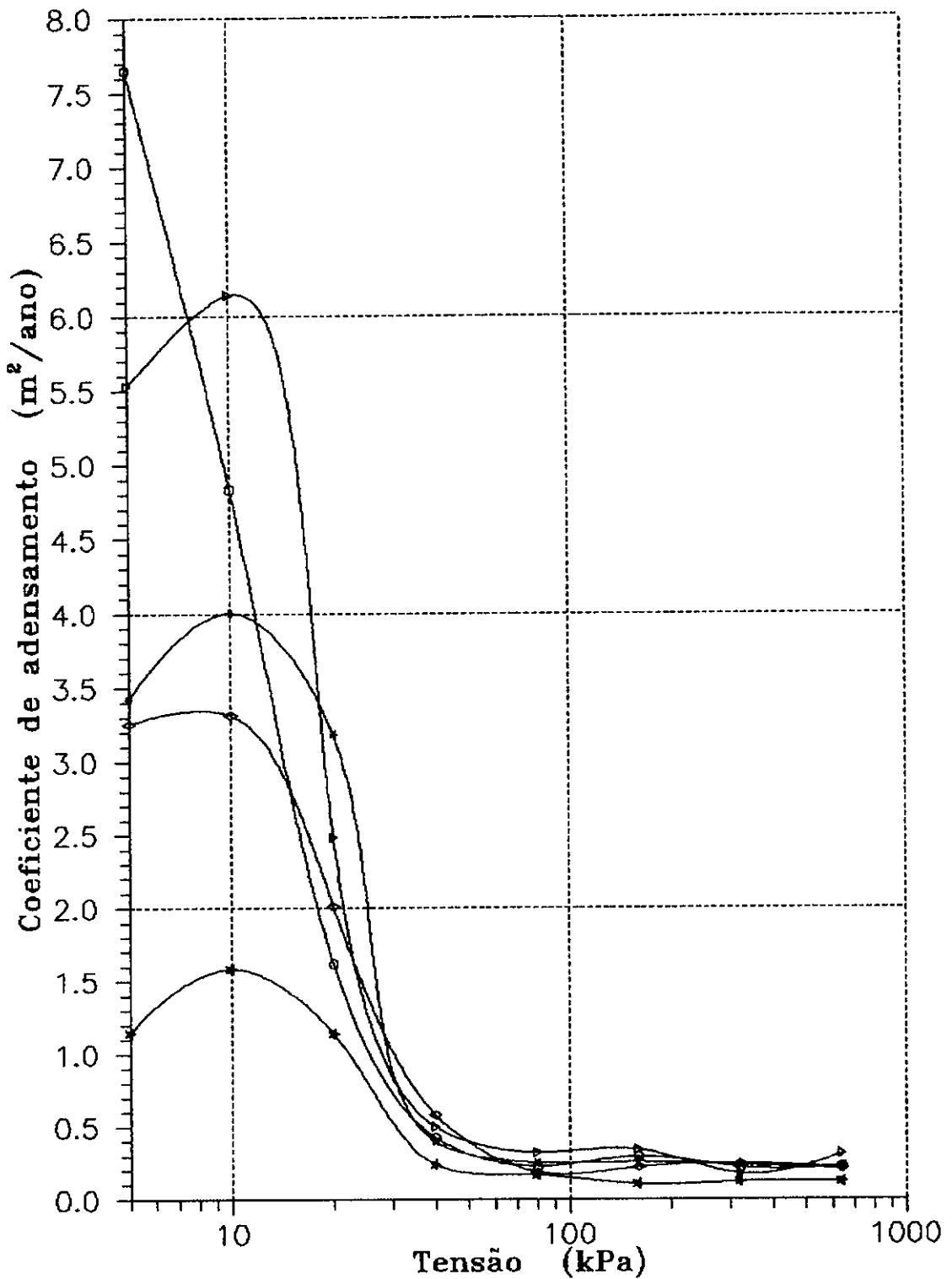


Figura 2.26 - Curva c_v : $\log \sigma'_v$ - Ensaio I4

***** 14 - Presente trabalho
 ○○○○○○ AV3-5 - Coutinho, 1976
 □□□□□ AV12-10 - Coutinho, 1976
 ◇◇◇◇◇ AV11-5 - Coutinho, 1976
 ++++++ AV2-10 - Coutinho, 1976

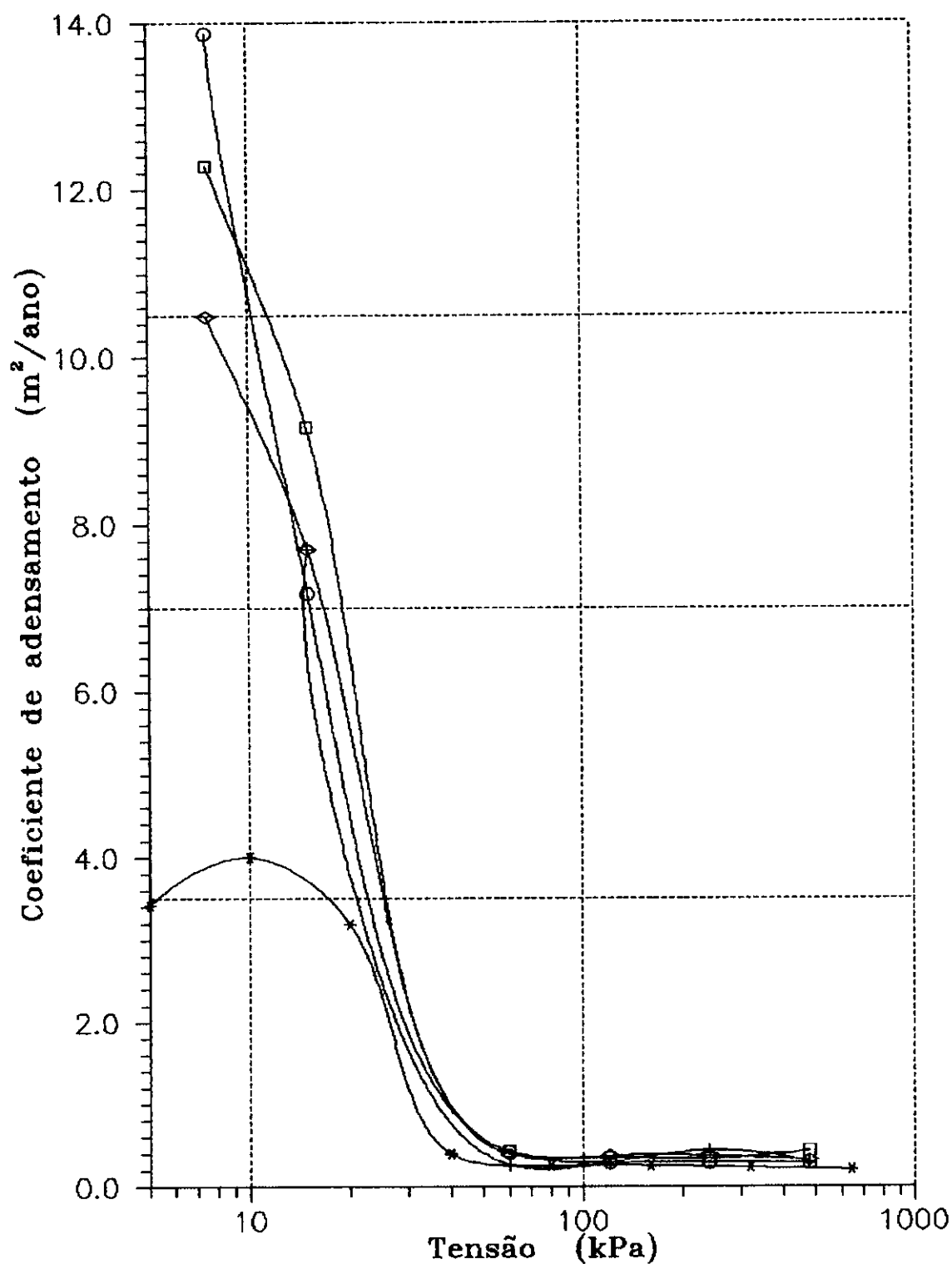


Figura 2.27 - Curva $c_v : \log \sigma'_v$ - Método de Casagrande

***** 14 - Presente trabalho
 ○○○○○○ AV3-5 - Coutinho, 1976
 □□□□□ AV12-10 - Coutinho, 1976
 ◇◇◇◇◇ AV11-5 - Coutinho, 1976
 ++++++ AV2-10 - Coutinho, 1976

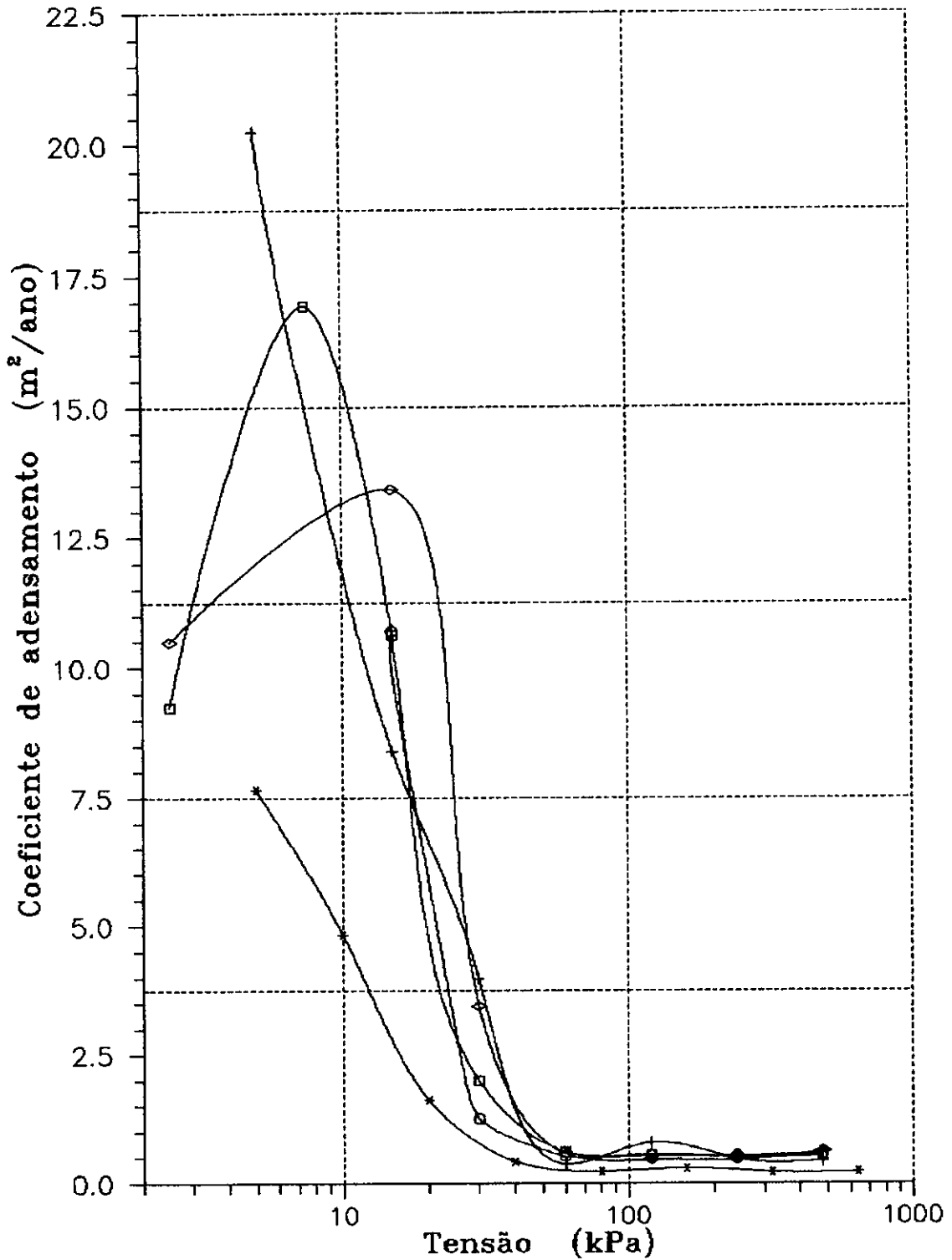


Figura 2.28 - Curva $c_v : \log \sigma'_v$ - Método de Taylor

Tabela 2.12 - Valores de c_v calculados pelo Método de Scott para diversos valores de N - Ensaio I2

$$\begin{aligned}\sigma'_v &= 80 \text{ kPa} & 2H_d &= 1,947 \text{ cm} & t &= 6 \text{ min} \\ d_s &= 1512 \text{ div} & d_t &= 1453 \text{ div} & d_s - d_t &= 59 \text{ div}\end{aligned}$$

N	d_{Nt} (div)	R_c	T_v	c_v (m^2/ano)
2	1430	0,7195	0,188	1,561 *
5	1381	0,4504	0,059	0,490 *
10	1330	0,3242	0,042	0,349
20	1272	0,2458	0,034	0,282
40	1226	0,2063	0,031	0,257
100	1188	0,1821	0,026	0,216
c_v médio (m^2/ano)				0,276

* valores não considerados na média

II.6.4 - COEFICIENTE DE COMPRESSIBILIDADE VOLUMÉTRICA.

Os valores do coeficiente de compressibilidade volumétrica m_v são apresentados na tabela 2.13 e nas figuras 2.29 a 2.32. A curva $m_v : \log \sigma'_v$ atingem um valor máximo local próximo à tensão da pré-adensamento, apresentando uma queda acentuada para tensões maiores, como previsto pela literatura (Janbu e outros, 1981; e Martins, 1983; etc.). Todavia, sendo a curva $m_v : \log \sigma'_v$ formada por dados discretos, optou-se por não estimar o valor de σ'_{vm} .

Tabela 2.13 - Coeficiente de compressibilidade volumétrica m_v , para a argila do Sarapu (10⁻³ kPa⁻¹).

TENSÃO (kPa)	PROFUNDIDADE (m)			
	2,0 a 2,5	2,5 a 3,0	4,0 a 4,5	5,0 a 5,5
005	6,212	4,752	4,549	3,132
010	7,183	5,276	4,672	2,498
020	6,659	5,557	5,164	2,855
040	5,853	6,183	5,830	6,314
080	2,752	3,040	3,135	3,400
160	1,158	1,200	1,225	1,291
320	0,512	0,519	0,535	0,549
640	0,234	0,227	0,238	0,240

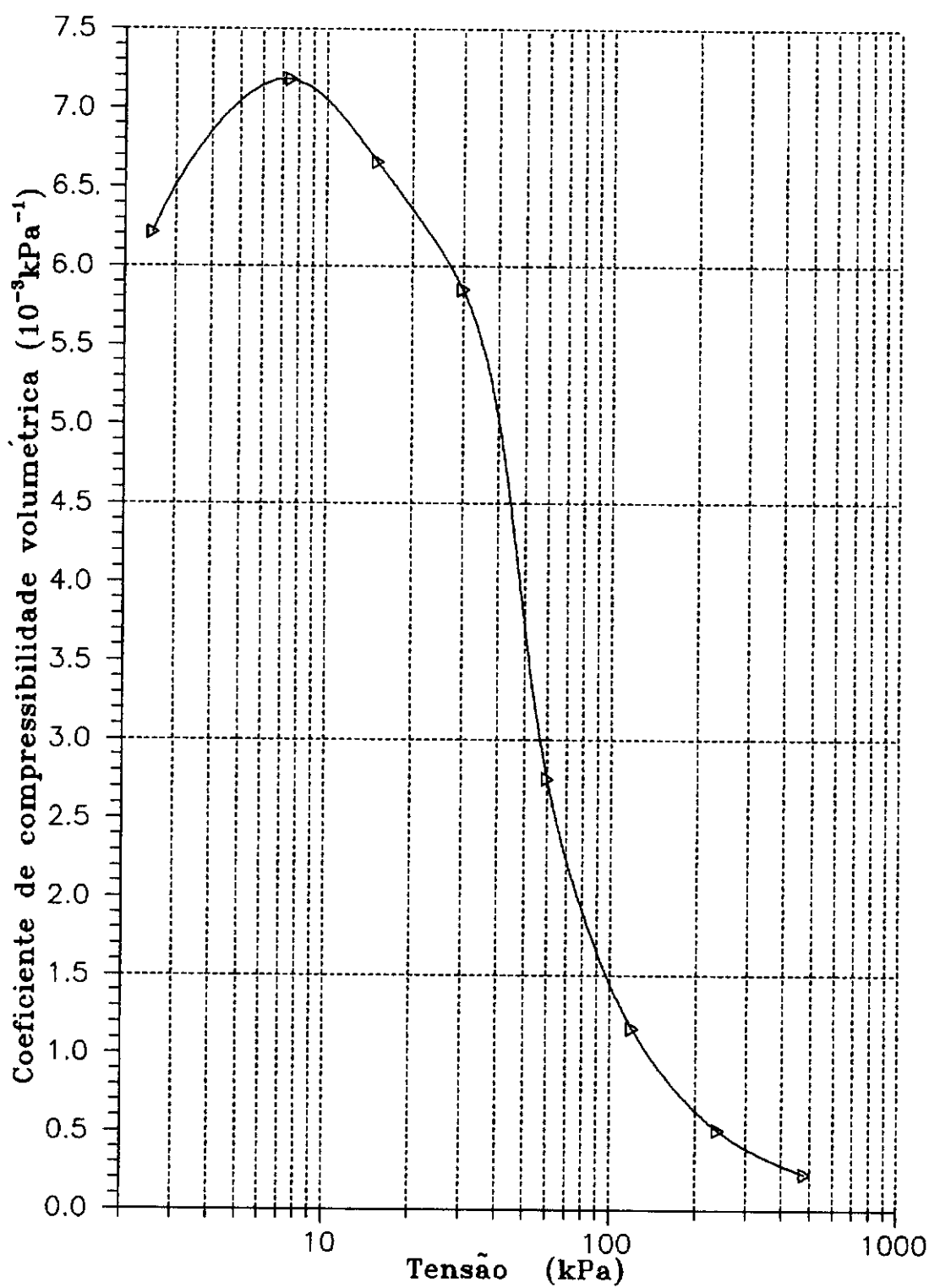


Figura 2.29 - Curva $m_v : \log \sigma'_v$ - Ensaio I1

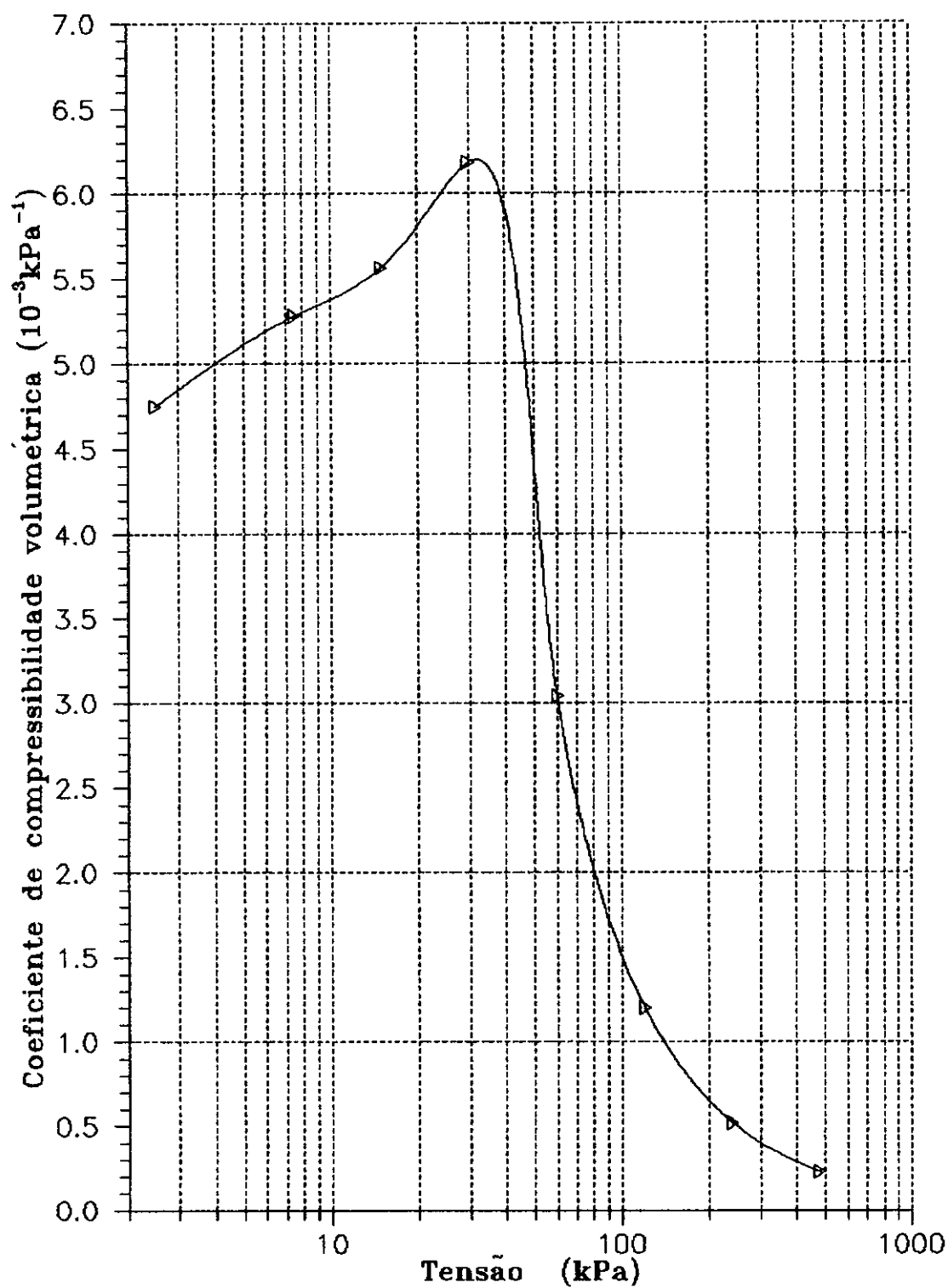


Figura 2.30 - Curva m_v : $\log \sigma'_v$ - Ensaio I2

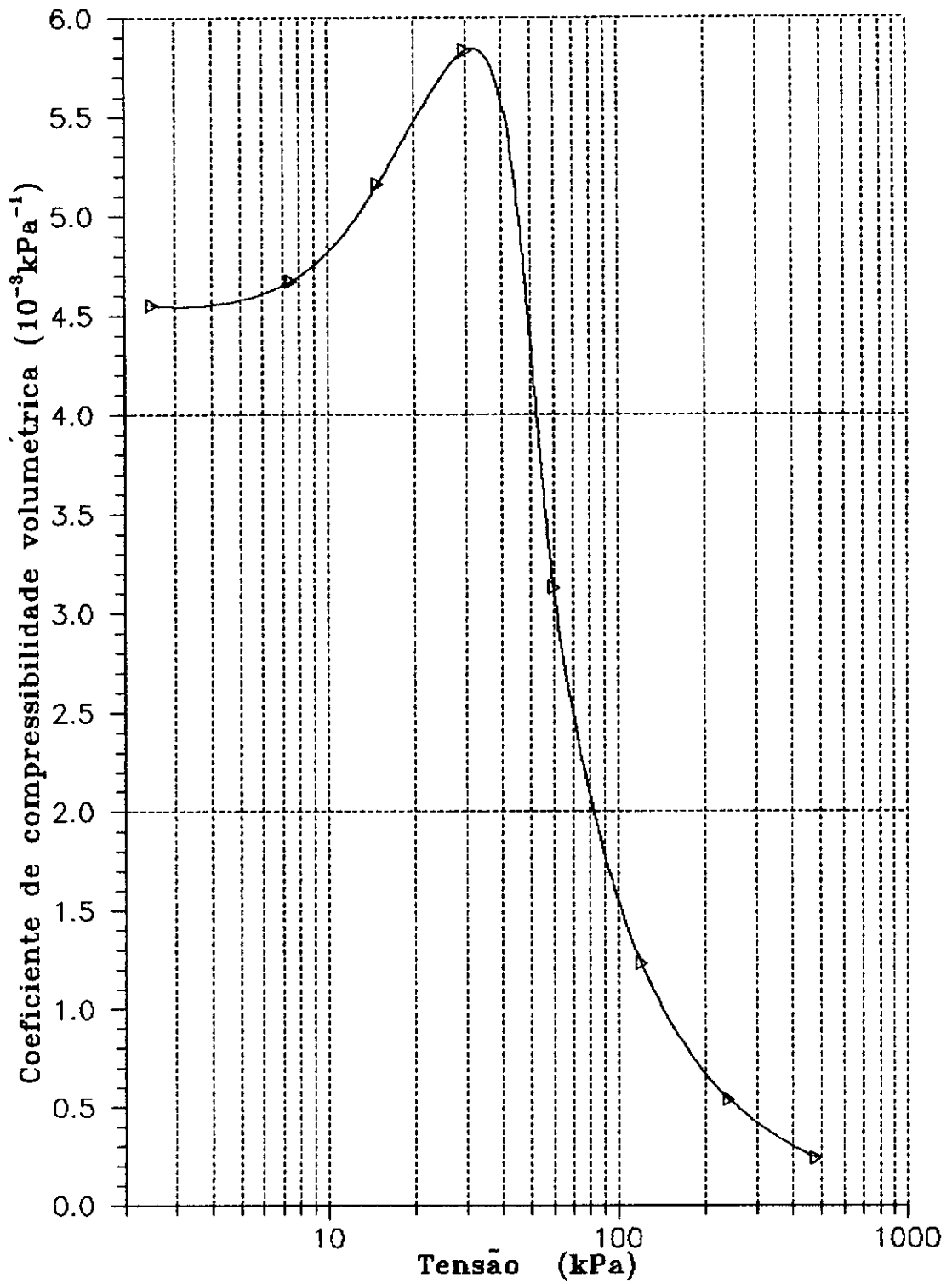


Figura 2.31 - Curva $m_v : \log \sigma'_v$ - Ensaio I3

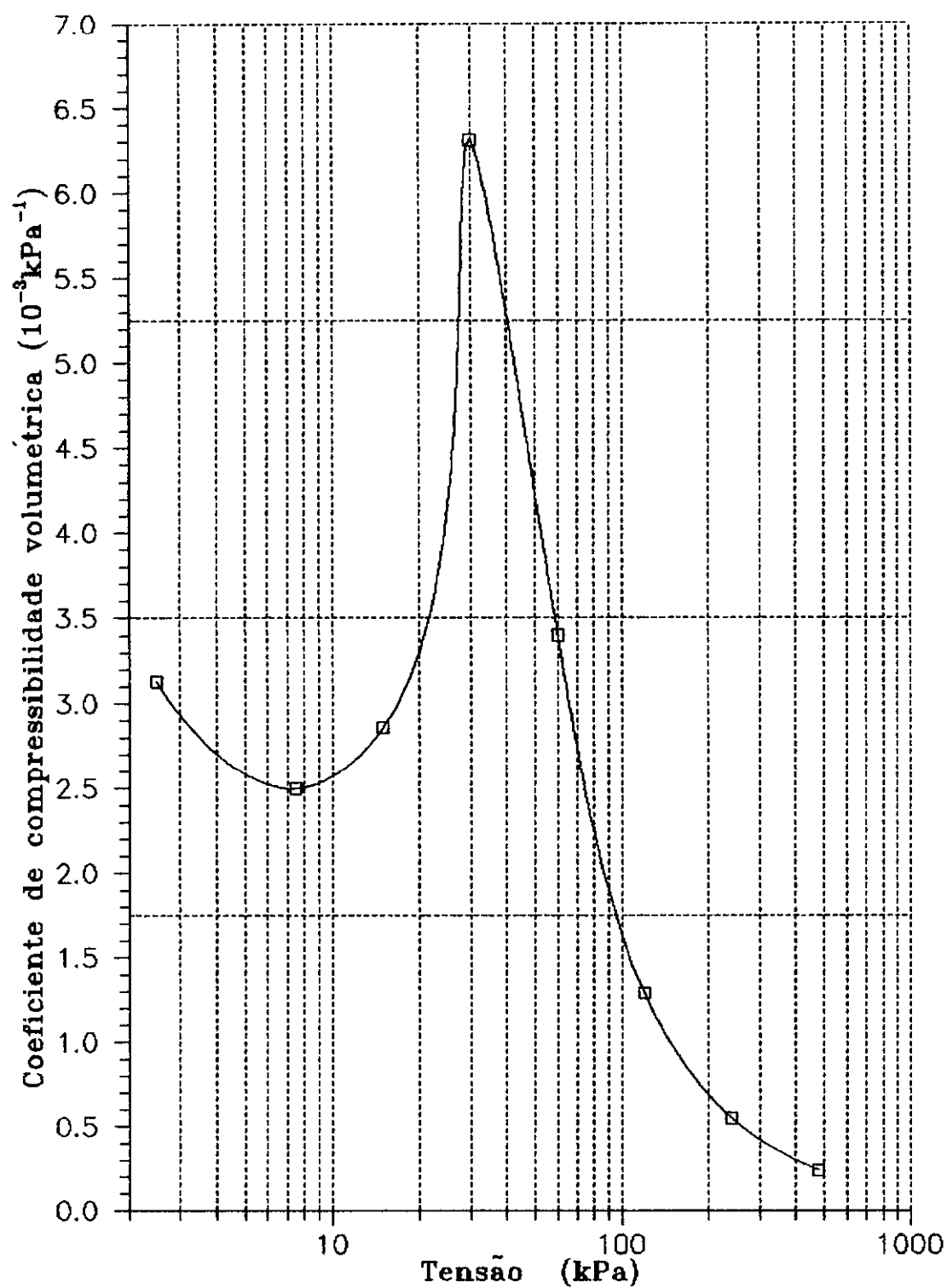


Figura 2.32 - Curva $m_v : \log \sigma'_v$ - Ensaio I4

II.7 - CONCLUSÕES PARCIAIS.

O trabalho apresentado neste capítulo permite chegar as seguintes conclusões:

- De uma maneira geral, os valores de σ'_{vm} obtidos pelos métodos de Pacheco Silva, Casagrande e Pacheco Silva modificado apresentam-se razoavelmente concordantes.
- A utilização da curva $\log(1 + e) : \log \sigma'_v$ lineariza o trecho de compressão virgem.
- O método de Pacheco Silva modificado não requer interpretação pessoal. Portanto, se o trecho de compressão virgem for linear no gráfico $\log(1 + e) : \log \sigma'_v$ recomenda-se a utilização deste método.
- Para tensões menores que a tensão de pré-adensamento, os métodos de Taylor e Su apresentam maiores valores de c_v do que os demais métodos aqui apresentados.
- Para tensões maiores do que a tensão de pré-adensamento todos os métodos apresentam valores similares para c_v .
- O método de Parkin apresenta os menores valores de c_v . Além de muito trabalhoso este método nem sempre pode ser utilizado, portanto não sendo recomendado para a determinação de c_v .
- O método de Scott tem como principal vantagem, para o caso de compressão unidimensional, a não necessidade de se acompanhar todo o ensaio de adensamento. Por outro lado, o número de leituras para os demais métodos é tão reduzido, em geral 16 leituras, que somente isto não justifica a sua utilização.

-O método de Su não ofereceu nenhuma vantagem adicional.

-Recomenda-se a utilização, para o caso de compressão unidimensional, dos já consagrados métodos de Casagrande e Taylor tendo em vista tanto a simplicidade de utilização destes como a contribuição irrelevante dos demais.

III - ENSAIO DE ADENSAMENTO DE FLUXO RESTRINGIDO

III.1 - INTRODUÇÃO.

Para a obtenção dos parâmetros de compressibilidade de um solo é prática comum o uso do ensaio edométrico incremental. Para a realização deste ensaio, geralmente são necessários de 10 a 15 dias. Uma outra inconveniência deste ensaio é a velocidade de aplicação de carga, que pode ser até 10000 vezes maior que a velocidade de carregamento no campo (Crawford, 1964; e Leroueil e outros, 1983). Com o objetivo de se resolver essas dificuldades vários pesquisadores vêm desenvolvendo diversas modalidades de ensaios edométricos diferentes do incremental.

O ítem a seguir apresenta uma breve revisão dos diversos tipos de ensaios edométricos que não o incremental, chamados aqui de ensaios contínuos.

Descreve-se também neste capítulo o equipamento aqui utilizado para a realização do ensaio contínuo de fluxo restringido, sendo então apresentados os resultados obtidos com esse equipamento.

III.2 - ENSAIOS EDMÉTRICOS CONTÍNUOS.

Revisões bibliográficas detalhadas relativas a ensaios contínuos tem sido apresentadas na literatura internacional (Head, 1983 e 1986; Olson, 1986) e nacional (Almeida, 1988; Carvalho, 1989) e portanto apenas os trabalhos mais importantes serão apresentados a seguir. Uma característica importante desses ensaios é a medida de poro pressão em pelo menos uma das faces do corpo de prova. Assim os ensaios contínuos são realizados com drenagem por apenas uma das faces.

III.2.1 - ENSAIOS A VELOCIDADE DE DEFORMAÇÃO CONSTANTE.

Hamilton e Crawford (1959) e Crawford (1964) foram os primeiros que apresentaram um ensaio de adensamento em que a velocidade de deformação era mantida constante. Este ensaio chamada de CRSC ("constant rate of strain consolidation") é o mais difundido, sendo por esta razão discutido mais detalhadamente abaixo.

Hamilton e Crawford (1959) argumentaram que o ensaio CRSC poderia ser utilizado com vantagens técnicas e econômicas, em relação ao ensaio edométrico incremental, uma vez que o ensaio à velocidade de deformação constante permite uma velocidade de carregamento mais próxima da que ocorre *in situ*, e por outro lado, o tempo de duração deste ensaio é muito menor que para o ensaio incremental. Nestes ensaios, a amostra de solo é carregada continuamente sem provocar valores excessivamente altos no gradiente de poro pressão.

Smith e Walls (1969) desenvolveram uma nova célula edométrica em que se podia controlar a velocidade de deformação com a aplicação da carga através de uma prensa de compressão, que é comumente encontrada nos laboratórios de mecânica dos solos e utilizada nos ensaios triaxiais. Smith e Walls (1969) desenvolveram também um modelo matemático para o ensaio CRSC baseado nas mesmas hipóteses de Terzaghi (1926) considerando apenas o fluxo estacionário.

Wissa e outros (1971) propuseram uma solução teórica para o ensaio CRSC incluindo a condição de fluxo transiente, buscando uma solução sem grandes dificuldades matemáticas. Esses autores também apresentaram uma nova célula de adensamento.

Lee (1981) apresentou uma solução de equação geral do adensamento em função da porosidade do solo. Na solução da equação foi utilizado um sistema de coordenadas convectivas na qual considera-se a variação da posição do elemento considerado com o tempo. Umehara e Zen (1980) propuseram uma solução teórica da equação do adensamento para o ensaio CRSC baseando-se na teoria das deformações finitas

desenvolvidas por Mikasa (1963). As soluções propostas por Lee (1981) e Umehara e Zen (1980) são muito úteis no estudo da consolidação de materiais muito compressíveis, quando se passa a uma consideração de deformações finitas.

III.2.2 - OUTROS ENSAIOS CONTÍNUOS.

Lowe e outros (1969) apresentaram um ensaio de adensamento com gradiente de poro pressão controlado (poro pressão na face não drenada mantida constante), e que foi denominado de CG ("controlled gradient consolidation test").

Um novo ensaio em que a carga é aplicada sobre a amostra a uma velocidade constante foi desenvolvido por Aboshi e outros (1970), e denominado CRL ("constant rate of loading") e que teve como base o trabalho teórico de Schiffman (1958). O equipamento empregado no ensaio CRL é similar ao utilizado em outros ensaios de carregamento contínuo, tais como, ensaios CRSC e CG.

O ensaio CL ("continuous loading"), proposto por Janbu e outros (1981), é uma combinação dos vários ensaios com carregamento contínuo apresentados anteriormente. No ensaio CL a amostra é submetida a um carregamento contínuo de modo a se obter durante todo o ensaio uma relação constante entre a poro pressão na base da amostra u_b e a tensão vertical aplicada σ_v .

Baseando-se nos trabalhos de Mesri e Rokhsar (1974) e Tavenas e outros (1979), Leroueil e outros (1980) propuseram uma modalidade de ensaio em que um único estágio de carregamento é aplicado sobre a amostra. O principal objetivo deste tipo de ensaio é permitir uma rápida determinação da tensão de pré-adensamento dos solos.

III.3 - DESCRIÇÃO DO EQUIPAMENTO DE ADENSAMENTO DE FLUXO RESTRINGIDO

III.3.1 - PRINCÍPIO DO ENSAIO.

Lee (1977, 1979) desenvolveu em Oxford uma nova modalidade de ensaio contínuo de adensamento em que a dissipação total do excesso de poro pressão na face drenante não se dá imediatamente após o carregamento, mas sim a uma velocidade controlada pela eficiência de um restritor de fluxo, que mantém o gradiente de excesso de poro pressão entre as duas faces do corpo de prova a valores próximos da nulidade. A velocidade de dissipação é controlada de tal forma que a distribuição do excesso de poro pressão seja o mais uniforme possível ao longo da altura da amostra.

Assim a distribuição de tensão efetiva será aproximadamente constante e pelo princípio das tensões efetivas, o mesmo ocorrerá com a distribuição do índice de vazios.

A figura 3.1 ilustra o princípio do ensaio de adensamento de fluxo restringido RFC ("restricted flow consolidation"), no qual a tensão total σ é medida na base da célula, a poro pressão é medida nas faces drenada u_t (poro pressão no topo) e na face não drenada u_b (poro pressão na base) e a deformação específica ε é calculada pelos valores de deslocamento da face superior do corpo, medidos por um LVDT montado sobre o pistão de carregamento. A figura 3.2 ilustra um resultado típico do ensaio RFC, onde as grandezas acima são representadas versus o número de leitura respectivo.

Conhecendo-se as poro pressões no topo e na base do corpo de prova, podem ser calculadas as tensões efetivas no topo σ'_t e na base σ'_b .

$$\sigma'_t = \sigma - u_t \quad (3.1)$$

$$\sigma'_b = \sigma - u_b \quad (3.2)$$

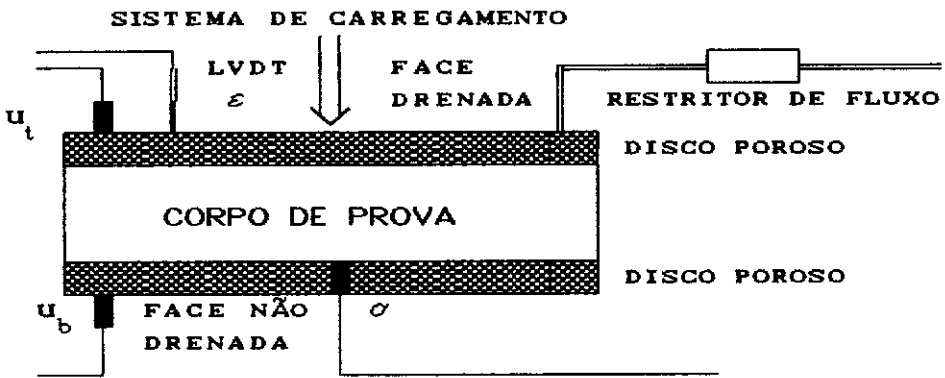


Figura 3.1 - Corte esquemático da célula RFC

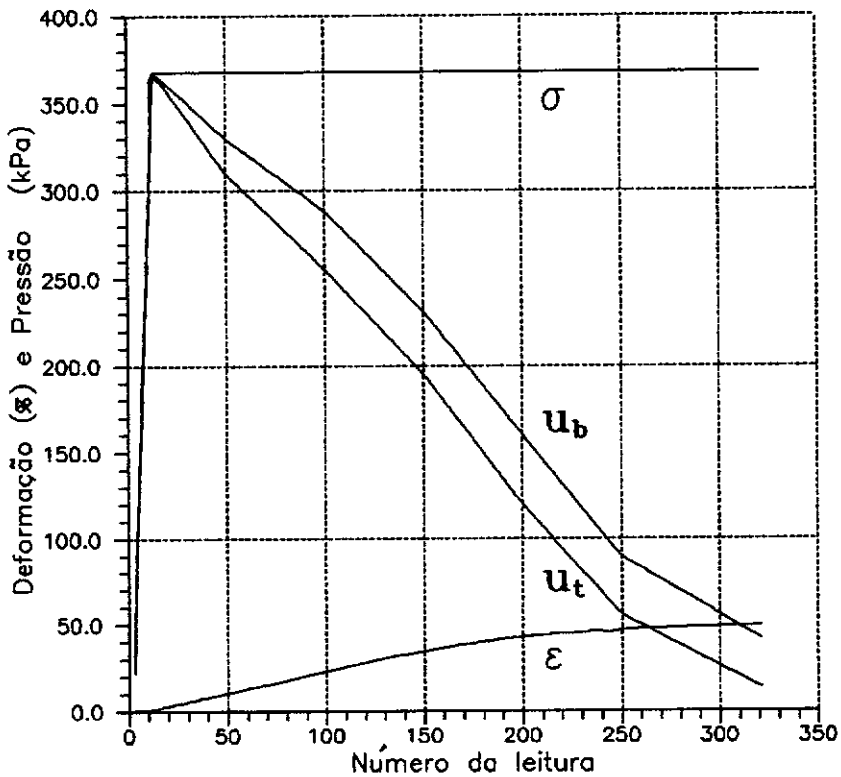


Figura 3.2 - Curva típica do ensaio RFC.

Admitindo-se uma distribuição parabólica de poro pressões, a tensão efetiva média σ'_m é dada por

$$\sigma'_m = \sigma - \frac{1}{3} \left(u_l + 2u_b \right) \quad (3.3)$$

Por outro lado, a variação do índice de vazios, e , pode ser calculada através das leituras de deformação como apresentado abaixo.

Sabendo-se que

$$\frac{e_o - e}{1 + e_o} = \varepsilon_v$$

ou

$$e = e_o - \varepsilon_v(1 + e_o)$$

obtem-se então

$$e = \frac{h_{vo} - \varepsilon_v h_o}{h_s} \quad (3.4)$$

onde:

h_{vo} é a altura inicial de vazios,

h_o é a altura inicial do corpo de prova,

h_s é a altura de sólidos,

e_o é o índice de vazios inicial,

ε_v é a deformação específica vertical, e

$\Delta\sigma$ é o acréscimo de tensão.

Desta forma, conhecendo-se a variação do índice de vazios e a tensão efetiva média a todo momento, pode-se traçar uma curva contínua de $e : \log \sigma'$.

Um resultado típico de curvas de índice de vazios versus σ'_b , σ'_l e σ'_m em escala \log é apresentado na figura 3.3.

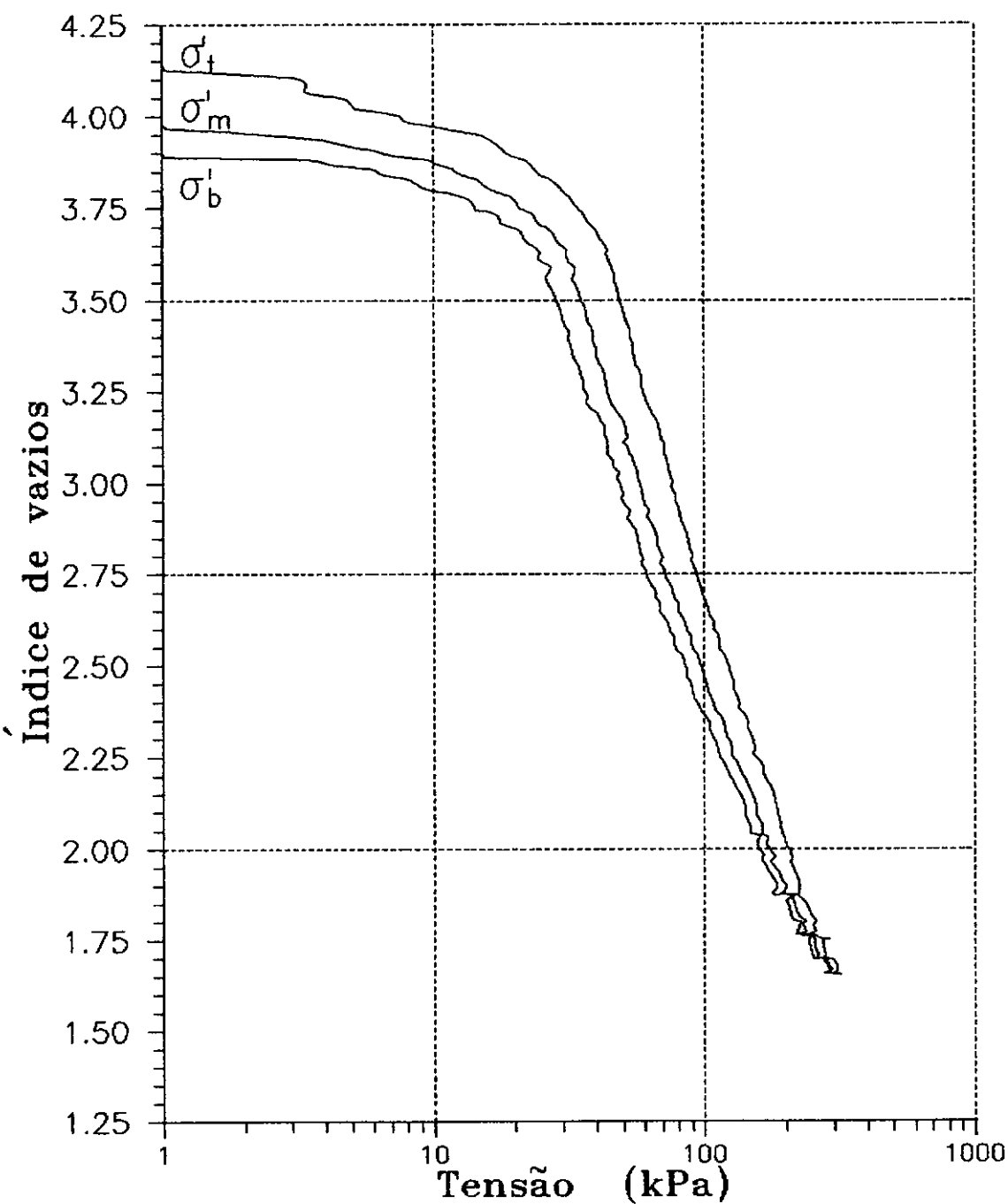


Figura 3.3 - Curvas $e : \log \sigma'_v$ para a face não drenada, face drenada e o ponto de poro pressão média; Ensaio RFC3

III.3.2 - ESQUEMA GERAL DO ENSAIO.

O esquema geral do ensaio RFC é apresentado na figura 3.4 e na foto 1. Cada um desses componentes são discutidos em detalhes nos itens abaixo.

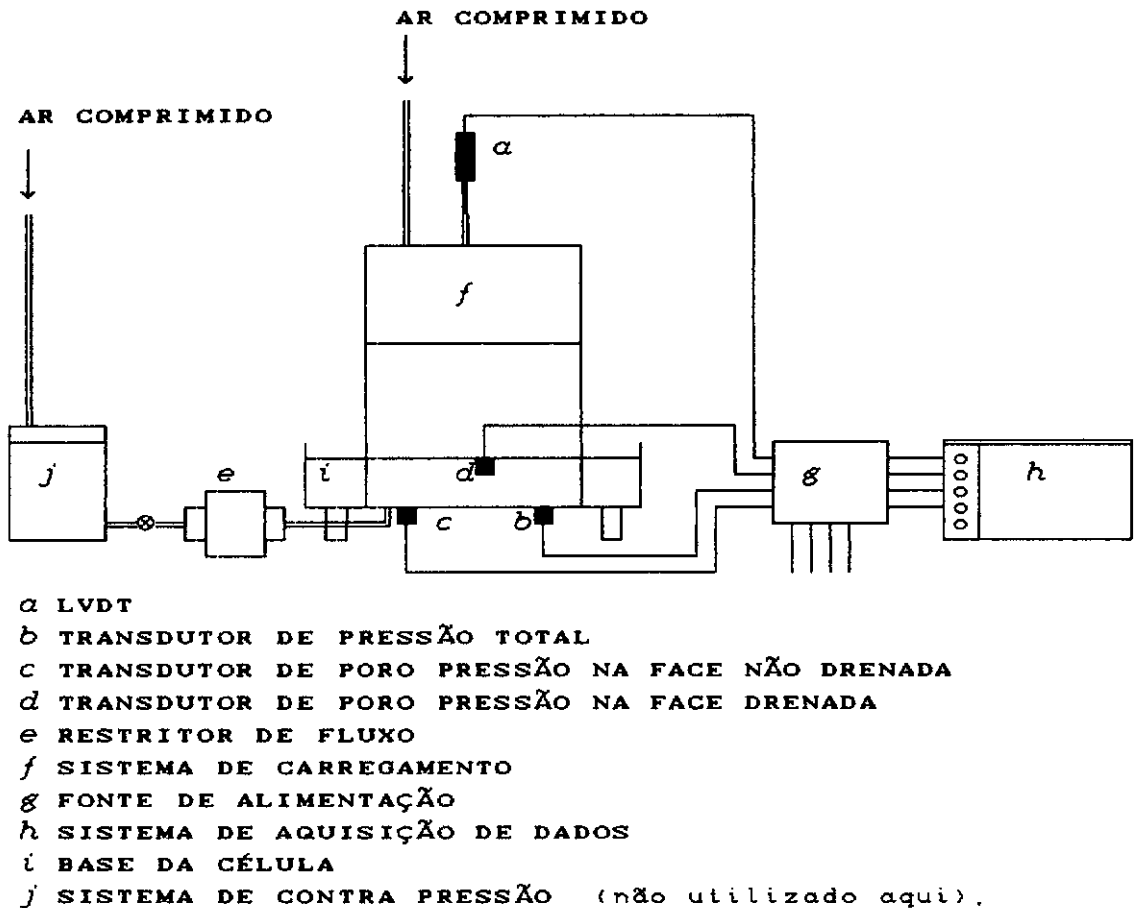


Figura 3.4 - Esquema geral do ensaio RFC.

III.3.3 - CÉLULA EDOMÉTRICA COM FLUXO RESTRINGIDO.

A célula aqui utilizada, figura 3.5. foi desenvolvida na Universidade de Oxford, sendo a mesma descrita com detalhe em Sills e outros (1986) e também em Head (1986). Esta célula foi cedida pela Dr. G. C. Sills (Universidade de Oxford) à COPPE durante a realização do presente

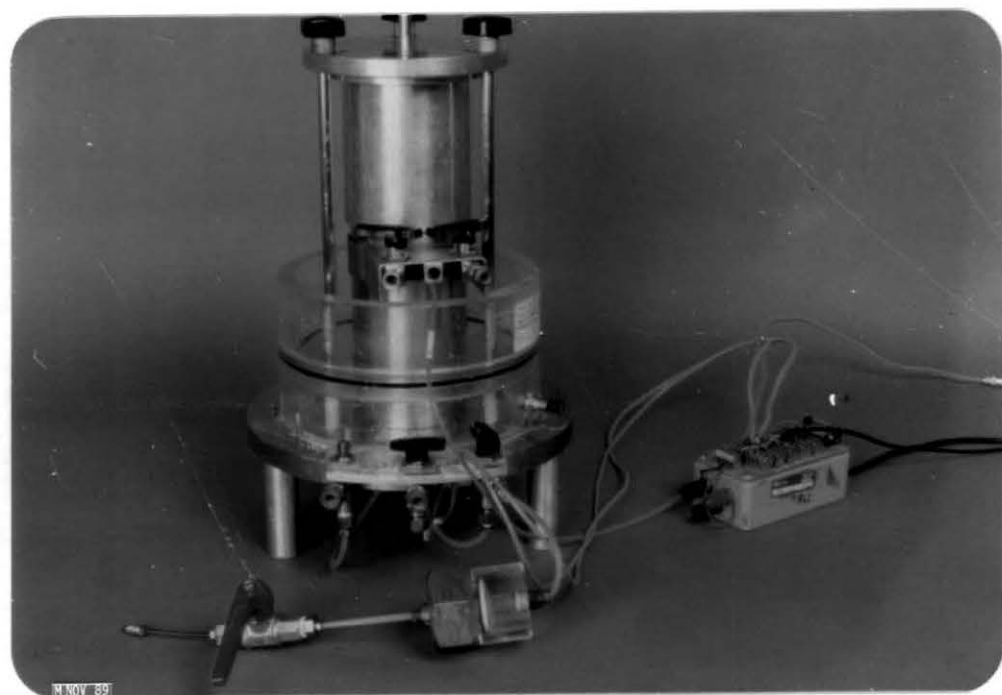


Foto 3.1 - Célula RFC

programa de ensaios.

Head (1986) sugere também a utilização da célula Rowe (Rowe e Barden, 1966) para a realização do ensaio de fluxo restringido. Entretanto ensaios RFC realizados com essa célula não foram satisfatórios (Sills, 1989)

A célula de adensamento para o ensaio RFC apresentada na figura 3.5 deve isolar completamente a amostra de modo que altas pressões na água dos poros do corpo de prova possam ser mantidas, tanto na face drenada quanto na face não drenada. Para a determinação da tensão efetiva, esta célula apresenta dois transdutores de poro pressão (1 e 2), um em cada uma das faces do corpo de prova, e um transdutor de pressão total (3) na base da célula.

Para a análise dos resultados deste ensaio é imprescindível que os excessos de poro pressão no topo e na base sejam determinados com a maior acurácia possível, e

para isto é necessário que esta célula permita a deaeração de todo o sistema de medida de poro pressão. Com a ocorrência de bolhas de ar a poro pressão gerada não se igualaria à tensão total aplicada, o que implica em uma tensão efetiva arbitrariamente aplicada na fase inicial de carregamento não-drenado.

Para que a deaeração possa ser garantida, a célula Oxford possui um anel de acrílico (4) que a envolve para permitir uma montagem submersa. Um outro procedimento utilizado para se evitar bolhas de ar na água é o fluxo d'água através das linhas de drenagem (5) próximas a cada transdutor, durante a montagem.

Sobre a base da célula de Oxford (6), o anel de aço inoxidável (7) com o corpo de prova é fixado com auxílio do corpo da célula (8) através de três hastes, não mostradas na figura, promovendo também o isolamento de ambas as faces do corpo de prova entre si e do sistema.

O anel de 75 mm de diâmetro interno e 20 mm de altura possui em uma de suas faces um chanfro para facilitar a moldagem do corpo de prova, e na outra uma ranhura (modificação efetuada na oficina mecânica da COPPE) para alojar um "o-ring" de vedação (9), complementando o sistema original que possuía apenas um "o-ring" na face biselada (10). Entre o corpo de prova e a base da célula é colocado um disco poroso de aço sinterizado (11), perfurado no centro para se adaptar o transdutor de pressão total (3). Sobre o corpo de prova, um outro disco poroso (12), também de aço sinterizado é colocado.

O transdutor de pressão total é ajustado no furo do disco poroso inferior, de modo que o seu diafragma fique nivelado com a face superior deste disco e em contato com o corpo de prova a fim de se medir a pressão total na base do corpo de prova.

A placa de carregamento (13) que transmite a carga do sistema de aplicação de carga, figura 3.6, para corpo de prova, é selado do resto do sistema por meio de um anel de seção quadrilateral ("quadriring") (14).

Entre a placa de carregamento e o disco poroso superior existe um disco de acrílico (15). Este disco foi

confeccionado na oficina mecânica da COPPE, visto ser o modelo original de aço, que para o tipo de solo aqui utilizado (argila mole do Sarapuí) transmitia uma tensão vertical considerável. Este disco de acrílico tem a finalidade de ajustar o pistão de carregamento ao corpo de prova e facilitar a deaeração da parte acima do corpo de prova durante a montagem.

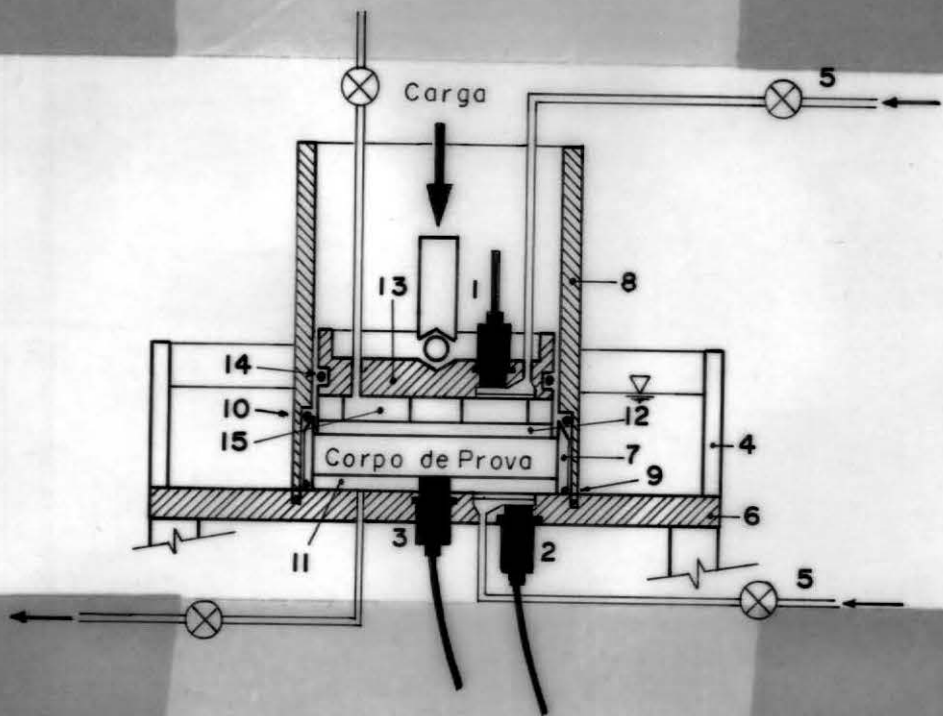


Figura 3.5 - Célula RFC.

III.3.4 - SISTEMA DE APLICAÇÃO DE CARGA.

A carga é aplicada sobre a amostra através de um sistema pneumático como mostrado na figura 3.6, o qual pode

ser acoplado sobre a célula edométrica de Oxford. A ação do ar comprimido faz com que o pistão de carregamento comprima o corpo de prova, à tensão desejada, a uma velocidade de deformação que é controlada pela drenagem do corpo de prova, a qual por sua vez é determinada pelo restritor de fluxo.

Tentando-se minimizar o efeito do atrito no pistão de carregamento, de modo que a pressão que atua no corpo de prova seja a mesma que à aplicada pelo ar comprimido, a vedação deste sistema é feita por meio de um diafragma de borracha flexível deslizando ("rolling diaphragm").

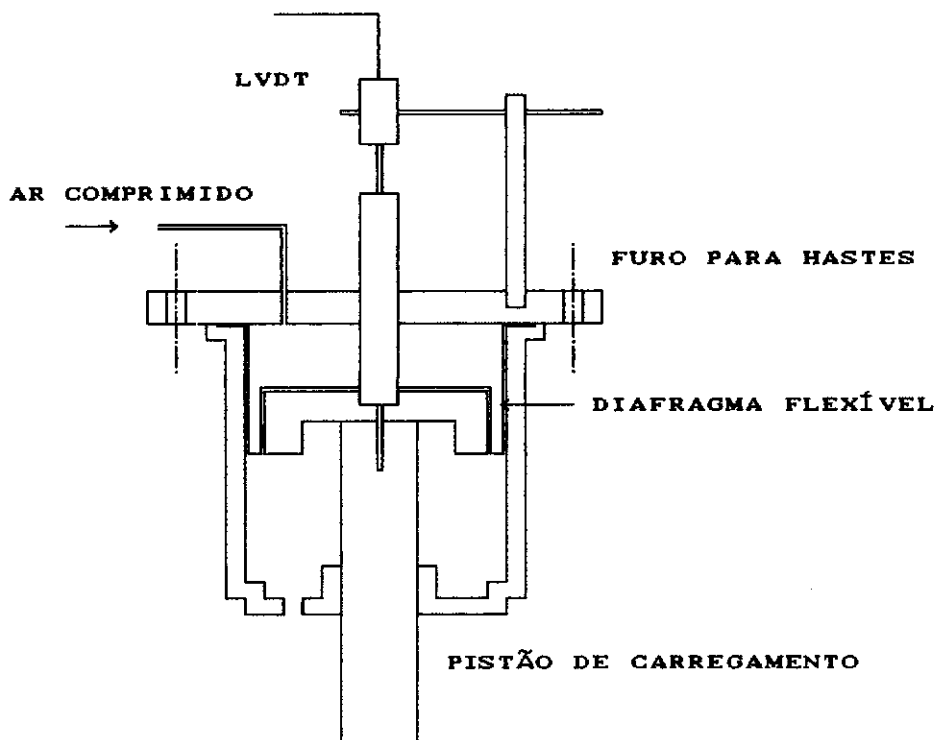


Figura 3.6 - Sistema de carregamento.

III.3.5 - RESTRITOR DE FLUXO.

O restritor de fluxo esquematizado na figura 3.7 e mostrado na foto 3.2, tem por finalidade controlar a velocidade de drenagem do corpo de prova, de forma que todo o gradiente hidráulico se dê através do restritor de fluxo.

O restritor é constituído por um conjunto de papéis filtro de permeabilidade adequada (tipo *Milipore* com microfuros de $0,025 \mu m$), onde cada sequência de 15 a 20 papéis são separados por um disco de aço inoxidável poroso além de um disco em cada um dos extremos deste conjunto.

Este conjunto de papéis filtro e discos de aço são colocados entre duas peças de acrílico, que são o corpo do restritor de fluxo, nos quais são comprimidos. Dependendo da intensidade da compressão que se dá aos papéis filtro, a permeabilidade do restritor varia, sendo mais impermeável quanto mais apertado estiver o conjunto.

O número de papéis filtro e o aperto a ser dado ao corpo do restritor de fluxo controlam a velocidade de drenagem a ser obtida e estes são determinados experimentalmente. Estes aspectos, de difícil controle, são considerados limitações ou desvantagens deste ensaio quando comparado, por exemplo, ao ensaio CRSC.

Conforme explicado acima, a velocidade de drenagem é portanto determinada experimentalmente para cada tipo de solo de modo que a diferença de poro pressão entre as faces do corpo de prova seja pequena.

III.3.6 - INSTRUMENTAÇÃO.

Todos os transdutores utilizados para a realização dos ensaios aqui apresentados foram calibrados antes da realização do primeiro ensaio, e suas constantes estão apresentadas pela tabela 3.1. Os três transdutores de pressão são do mesmo tipo, fabricados pela *Druck*. As leituras de deslocamento foram obtidas com um transdutor de deslocamento elétrico, LVDT, com curso linear de 30 mm, de fabricação do IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas-SP),

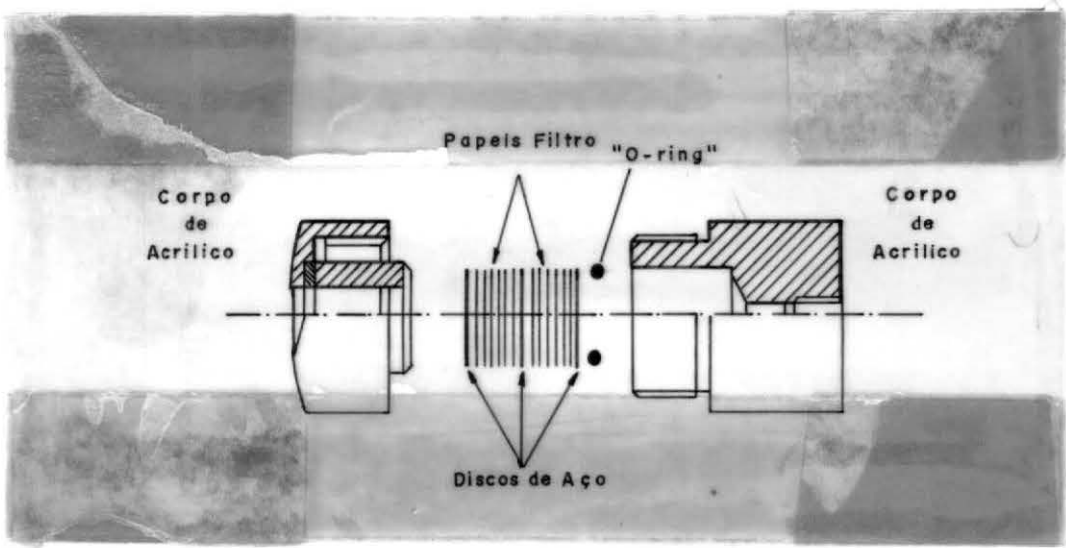


Figura 3.7 - Restritor de fluxo.

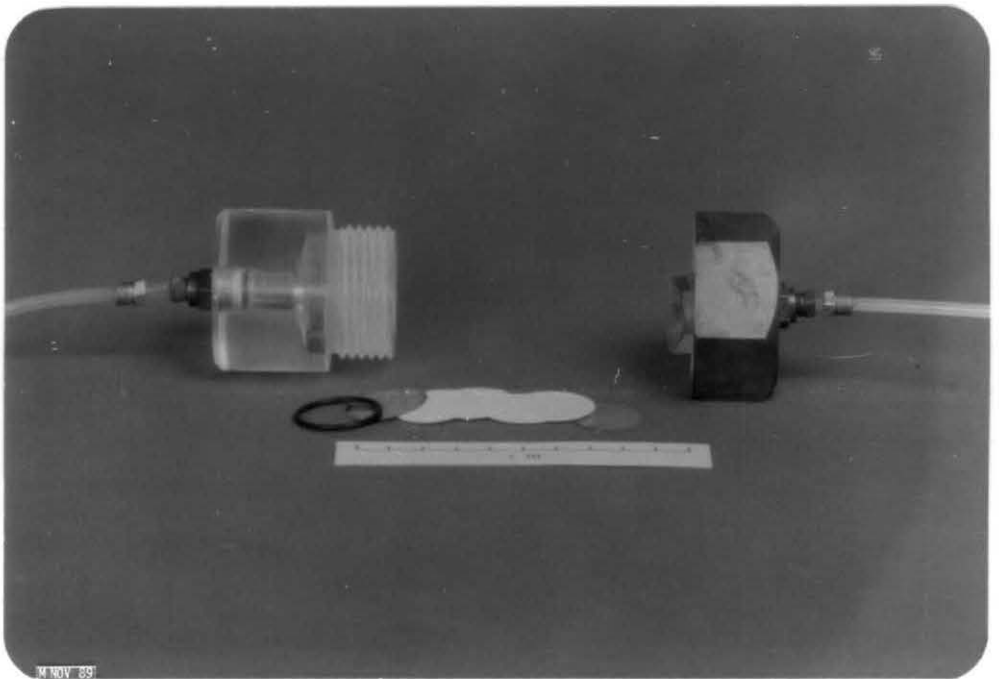


Foto 3.2 - Restritor de fluxo.

montado sobre o pistão de carregamento.

A deformação da célula RFC devido à tensão vertical σ_v aplicada, também foi medida. Para a calibração da célula a montagem foi feita substituindo-se o corpo de prova de solo por um disco metálico e tomando-se leituras de deformação a cada incremento de tensão. A curva de calibração da célula é apresentada pela figura 3.8.

Tabela 3.1 - Constantes dos transdutores.

Transdutor	Constante
LVDT	100,0 <i>mV/mm</i>
Pressão total	9,228 <i>kPa/mV</i>
Porosidade topo	18,570 <i>kPa/mV</i>
Porosidade base	9,334 <i>kPa/mV</i>

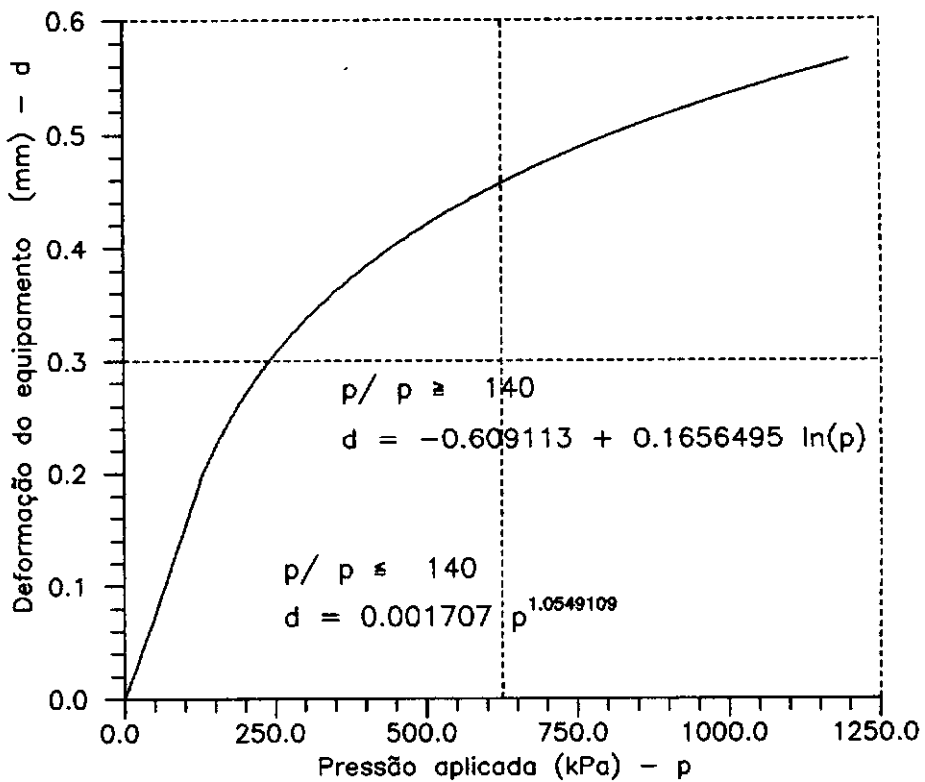


Figura 3.8 - Curva de calibração da célula RFC.

III.3.7 - SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS.

Para o acompanhamento dos ensaios, dois sistemas de leituras foram empregados. Durante o dia, os valores medidos nos ensaios foram registrados através de leituras manuais, e no período da noite os registros foram obtidos por meio do sistema automático de aquisição de dados descrito por Lira (1988). O sistema de aquisição de dados não pode ser utilizado durante o dia visto que nesse período o mesmo estava sendo utilizado em ensaios *in situ* tipo piezocone.

Os equipamentos utilizados nestes sistema foram:

Multímetro digital.

As leituras manuais foram realizadas com um multímetro digital modelo HP-3478A, de fabricação da HP, com resolução de 5 ¹/₂ dígitos.

Microcomputador.

O microcomputador utilizado no acompanhamento dos ensaios aqui apresentados é um HP-85B com 32 kbytes de memória RAM, e um disco eletrônico com 128 kbytes de memória. Este micro é equipado com 3 ROMs:

- .uma ROM "Mass storage",
- .uma ROM "Advanced Programming", e
- .uma ROM I/O.

Os dados resultantes dos ensaios foram processados em um PC XT equipado com:

- .Disco rígido de 30 Mbytes,
- .Co-processor aritmético 8087 , e
- .A CPU possui clock de 4,77 e 8 MHz e processador NEC V 20.

Conversor A/D.

O conversor A/D utilizado é um modelo HP-3421A de fabricação da HP, com 20 canais para leituras de sinais,

permitindo leituras em correntes contínuas ou alternadas, com resolução máxima de $5^{1/2}$ dígitos.

Fontes de alimentação.

O transdutor de deslocamento foi alimentado por uma fonte demoduladora de fabricação do IPT, esta fonte é parte integrante do modelo do transdutor utilizado. Os transdutores de pressão foram alimentados por uma fonte estabilizada de 5 Volts.

III.4 - RESULTADOS DOS ENSAIOS.

III.4.1 - VALORES MEDIDOS DURANTE O ENSAIO.

Os resultados aqui apresentados foram obtidos de ensaios RFC realizados em cinco amostras de solo, sendo quatro destas retiradas dos mesmos amostradores SHELBY em que foram realizados os ensaios incrementais apresentados no capítulo II, e outra na profundidade de 7,00 a 7,50 m. Esses cinco ensaios são, anologicamente aos ensaios incrementais, aqui denominados de RFC1 a RFC5.

Para se ajustar a velocidade de drenagem adequada a este tipo de solo, várias tentativas quanto ao número de papeis filtro foram realizadas, optando-se por 48 papeis filtro. A duração de cada ensaio foi de aproximadamente 24 horas e em cada ensaio cerca de 220 leituras foram obtidas.

Os valores de tensão vertical total σ_v , poro pressão na base u_b , poro pressão no topo u_t e deformação específica ϵ em cada ensaio são apresentados nas figuras 3.9 a 3.13. Observa-se destes resultados que existe alguma variação de σ_v durante o ensaio que pode ser causada ora por variações na pressão do ar comprimido da rede ora pela variação do atrito entre o pistão de carregamento e a célula.

Os valores de σ_v alcançaram um valor máximo da ordem de 300 kPa, em incrementos de 50 kPa num período 60 s, como pode ser visto pelas figuras 3.9 a 3.13, isto porque a pressão de ar comprimido máxima disponível na rede era de

350 kPa. Também, pelo programa de ensaios, o tempo previsto para cada ensaio era de 24 horas e se fosse aplicada uma pressão muito maior que 350 kPa restaria ao fim deste período um alto excesso de poro pressão não dissipado.

Como se apresenta nas figuras 3.9 a 3.13, durante o processo de adensamento, a diferença entre a poro pressão na base e a poro pressão no topo ($u_b - u_t$) não ultrapassou ao valor de 50 kPa, fazendo com que os valores de u_b e u_t se mantivessem próximos ao longo de todo o ensaio. Também se pode dizer que a velocidade de dissipação do excesso de poro pressão é aproximadamente uniforme ao longo de toda a espessura da amostra, uma vez que as curvas u_b e u_t são aproximadamente paralelas.

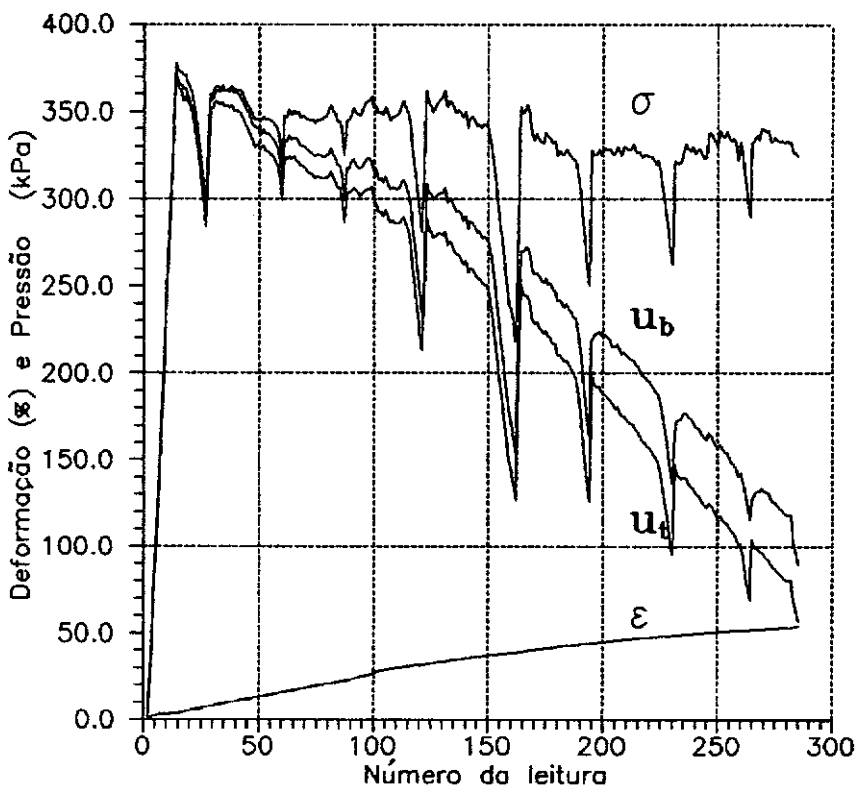


Figura 3.9 - Valores medidos no ensaio RFC1

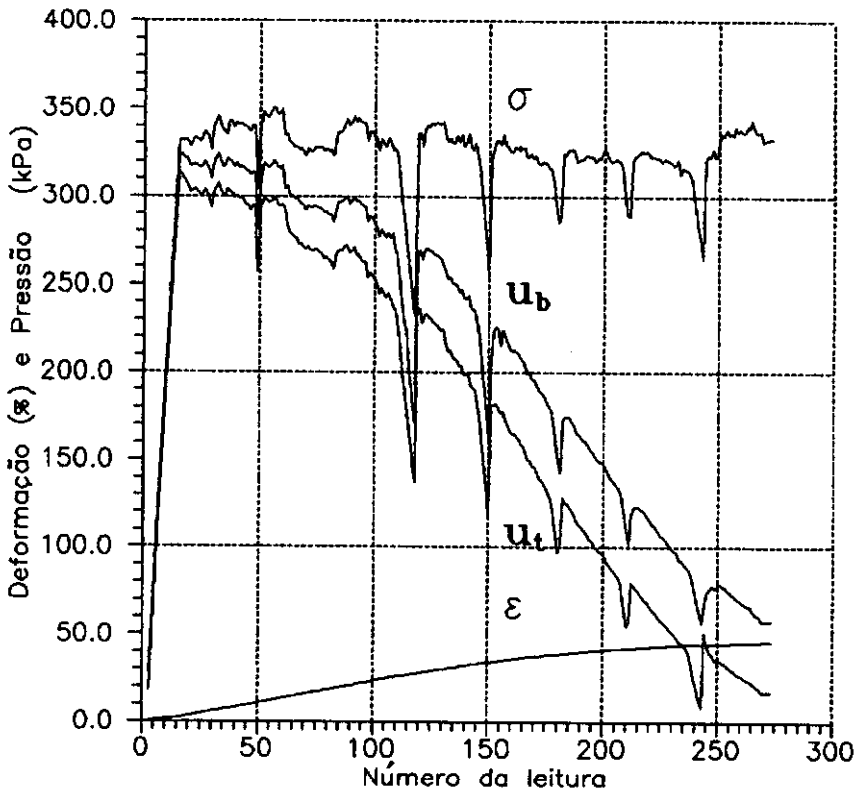


Figura 3.10 - Valores medidos no ensaio RFC2

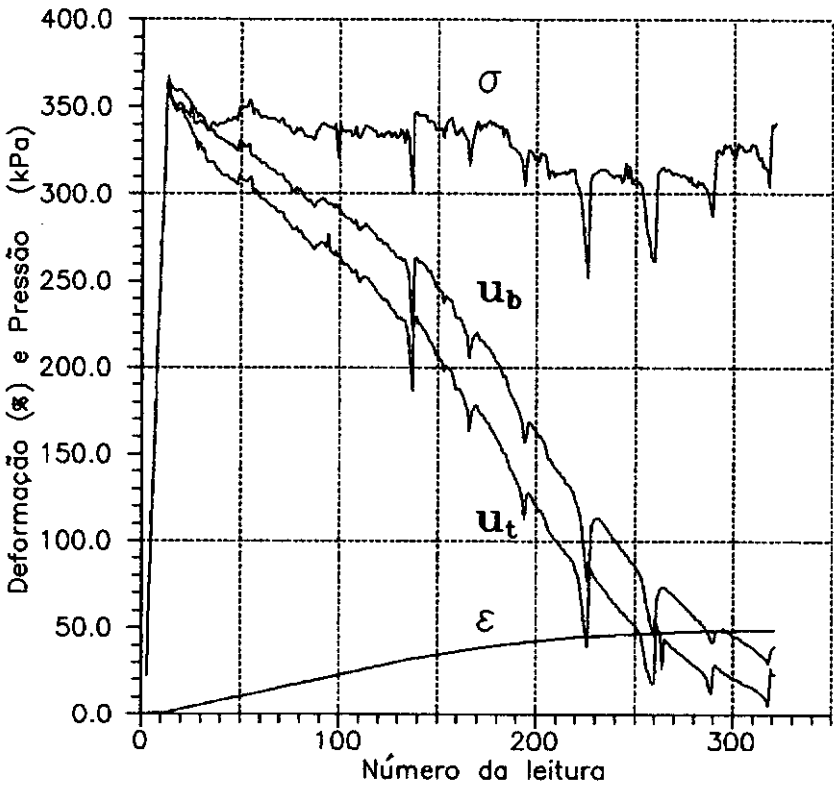


Figura 3.11 - Valores medidos no ensaio RFC3

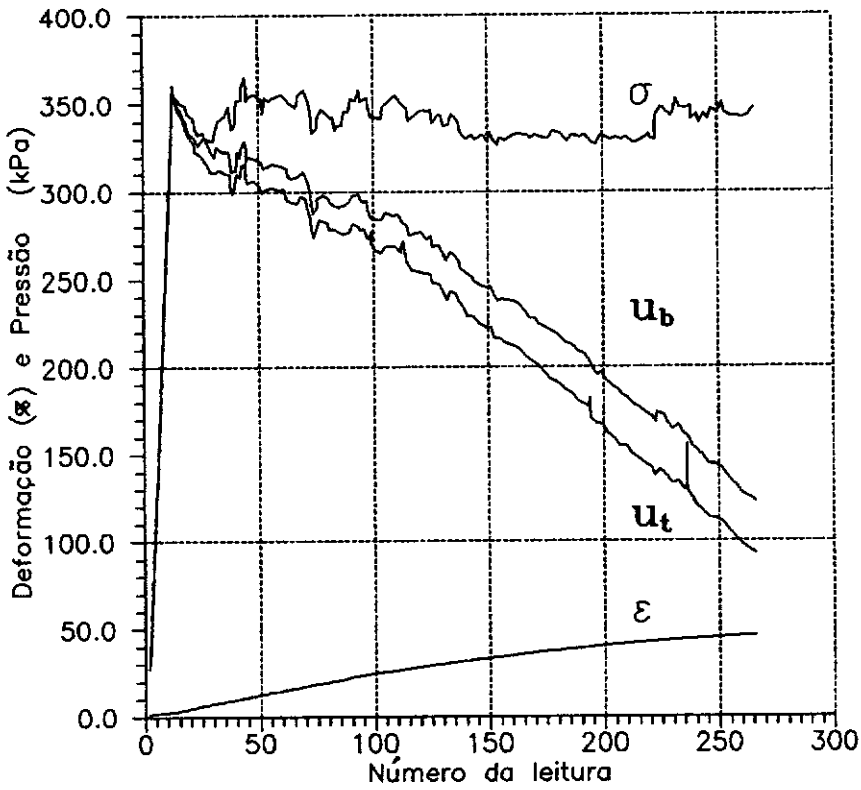


Figura 3.12 - Valores medidos no ensaio RFC4

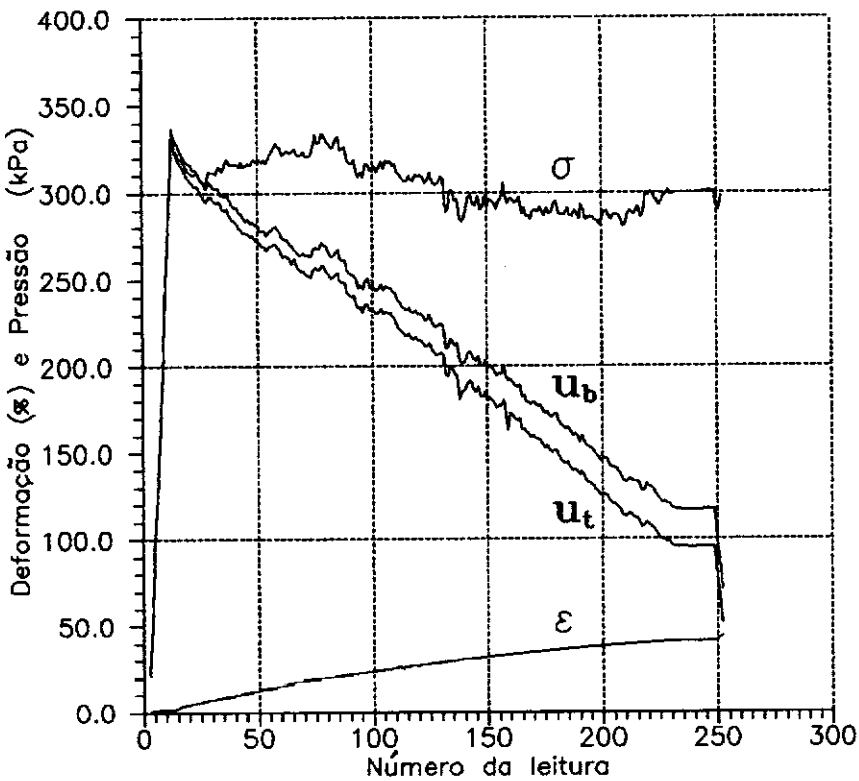


Figura 3.13 - Valores medidos no ensaio RFC5

III.4.2 - INFLUÊNCIA DA DEFORMAÇÃO DA CÉLULA.

De forma a ilustrar a influência da deformação da célula nos resultados dos ensaios RFC apresenta-se na figura 3.14 dois gráficos e : $\log \sigma'_v$ com e sem correção da deformação da célula. Como se observa na figura 3.14 a correção não é desprezível e portanto será incorporada aos resultados a serem apresentados abaixo.

III.4.3 - CURVAS ÍNDICE DE VAZIOS VERSUS TENSÃO EFETIVA VERTICAL.

As figuras 3.15 a 3.17 apresentam as curvas e : $\log \sigma'_v$ resultantes dos ensaios de adensamento incremental e contínuo RFC. A figura 3.18 apresenta apenas a curva e : $\log \sigma'_v$ para o ensaio RFC, visto que os resultados do ensaio incremental a esta profundidade não foram satisfatórios.

As curvas para o ensaio incremental representam o índice de vazios ao final do adensamento primário, e_{100} . Este gráfico utilizando o e_{100} , ao invés daquele com o índice de vazios correspondente a 24 horas, é mais adequado para comparação com o do ensaio RFC, no qual as deformações por compressão secundária são pequenas tendo em vista a duração total de cerca de um dia para esse ensaio. Adicionalmente o gráfico $e_{100} : \log \sigma'_v$ é o recomendado atualmente (Jamiolkowski e outros, 1985) para a obtenção dos parâmetros de compressibilidade do solo.

A concordância entre as curvas dos ensaios incremental e RFC é excelente para a profundidade de 2,00 a 2,50 m (figura 3.15), boa para a profundidade de 5,00 a 5,50 m (figura 3.18) e apenas razoável para as profundidades de 2,50 a 3,00 m (figura 3.16) e de 4,00 a 4,50 m (figura 3.17). Nestes dois últimos casos as curvas são aproximadamente paralelas, sendo possível que algum erro na determinação do índice de vazios inicial dos corpos de prova tenha afetado esses resultados.

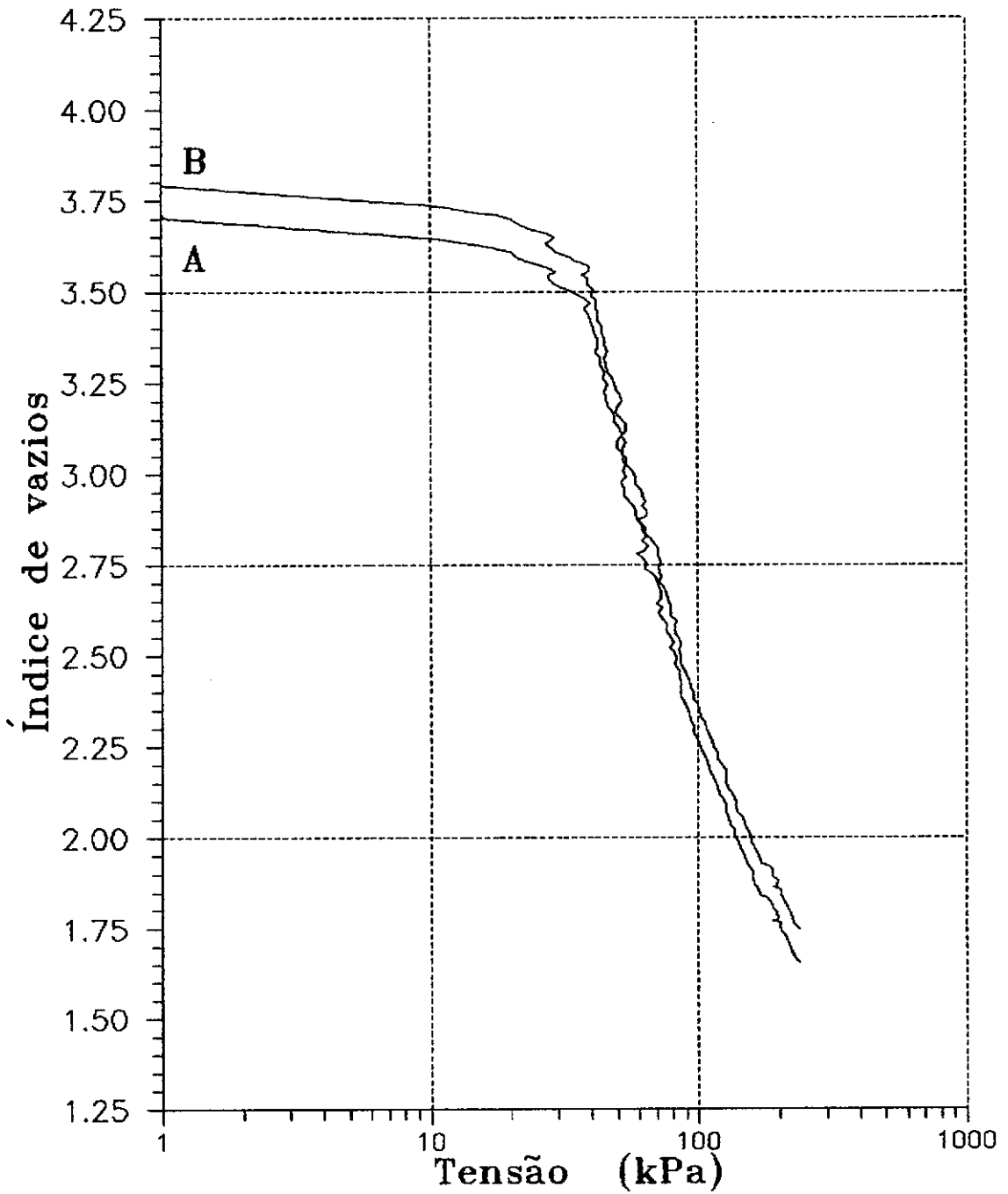
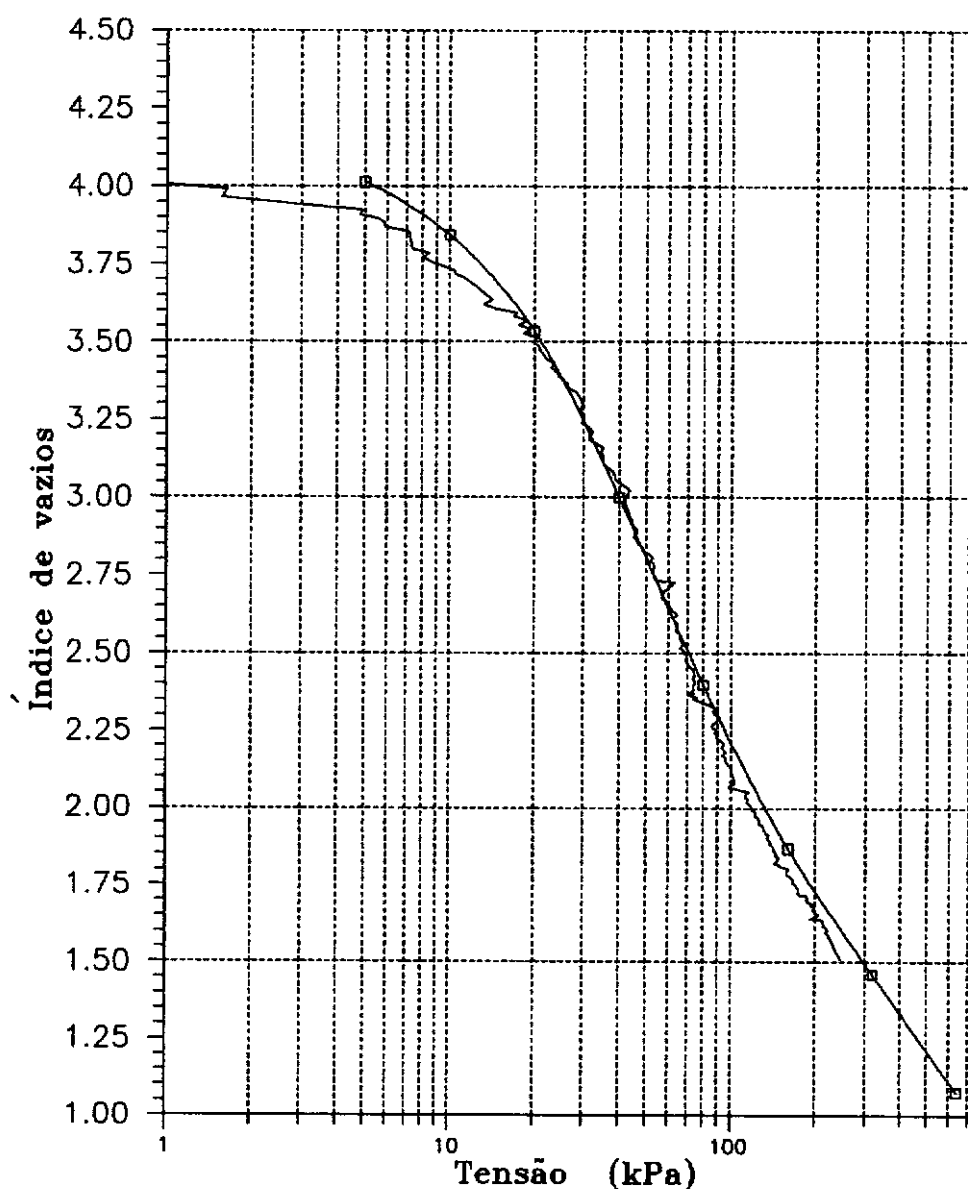


Figura 3.14 - Influência da deformação da célula nas curvas $e : \log \sigma'_v$. Curva A, índice de vazios não corrigido; curva B, índice de vazios corrigido - Ensaio RFC3

Apresenta-se nas figuras 3.19 a 3.23 os resultados dos ensaios RFC no gráfico $\log(1 + e) : \log \sigma'_v$. A utilização deste tipo de gráfico tende a linearizar o trecho de compressão virgem principalmente para amostras a pequenas profundidades, sendo menor este efeito para os ensaio RFC4 e RFC5.

— Adensamento com Fluxo Restringido - RFC1
 □□□□ Adensamento Incremental - I1



— Adensamento de Fluxo Restringido — RFC2
 □□□□ Adensamento Incremental — 12

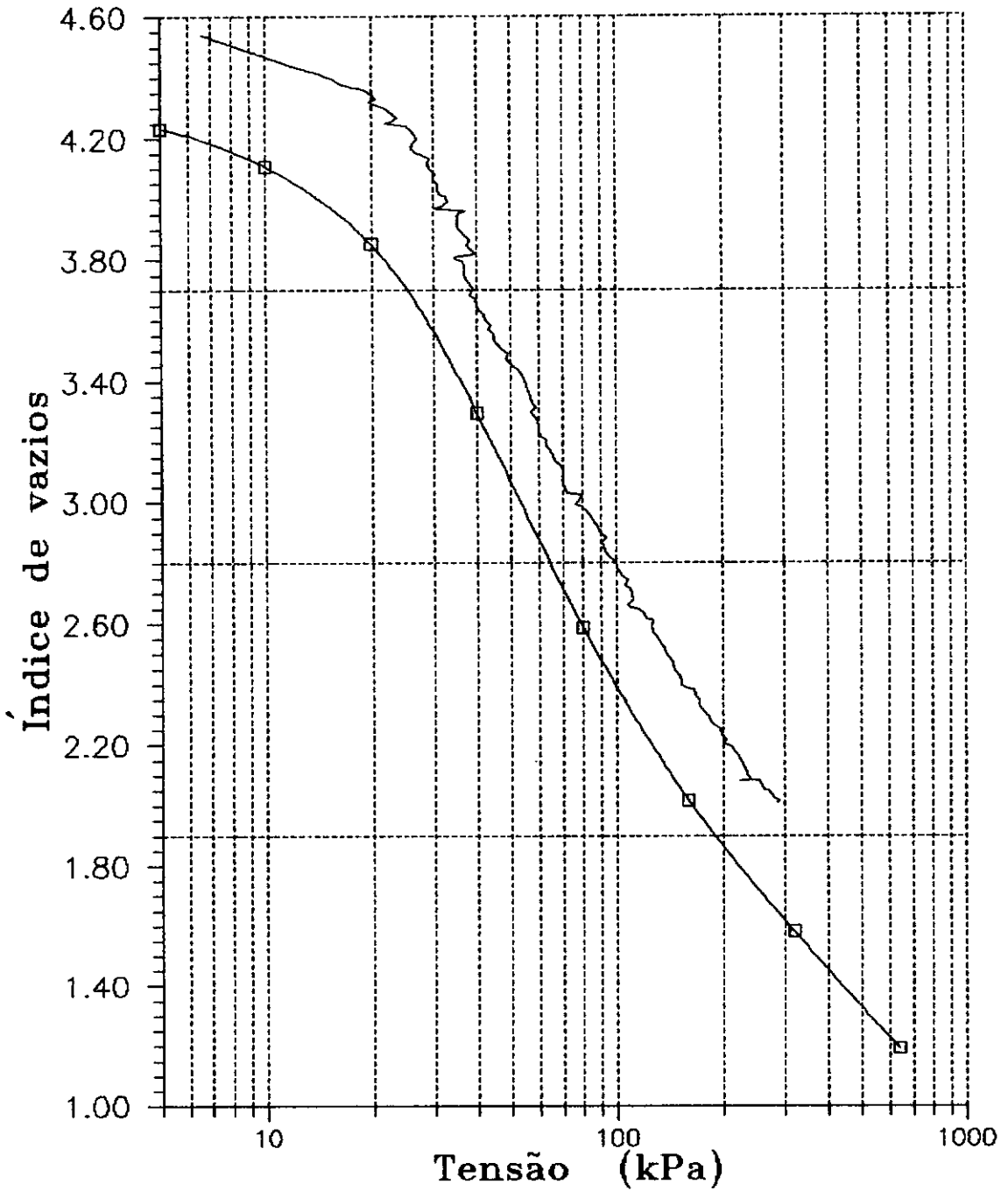
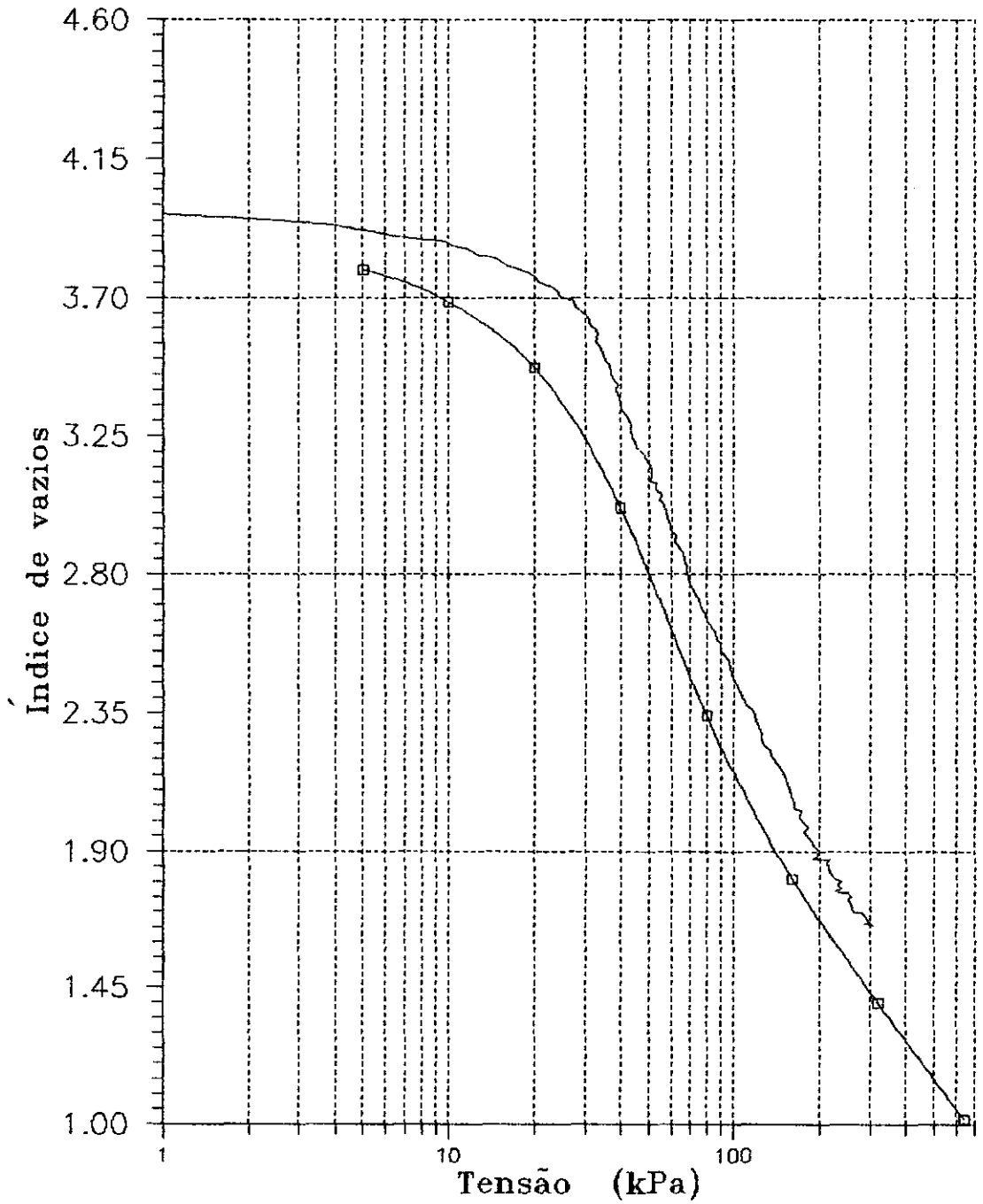


Figura 3.16 - Curva $e : \log \sigma'_v$ - amostra de 2,50 a 3,00 m

— Adensamento com Fluxo Restringido - RFC3
□□□□ Adensamento Incremental - 13



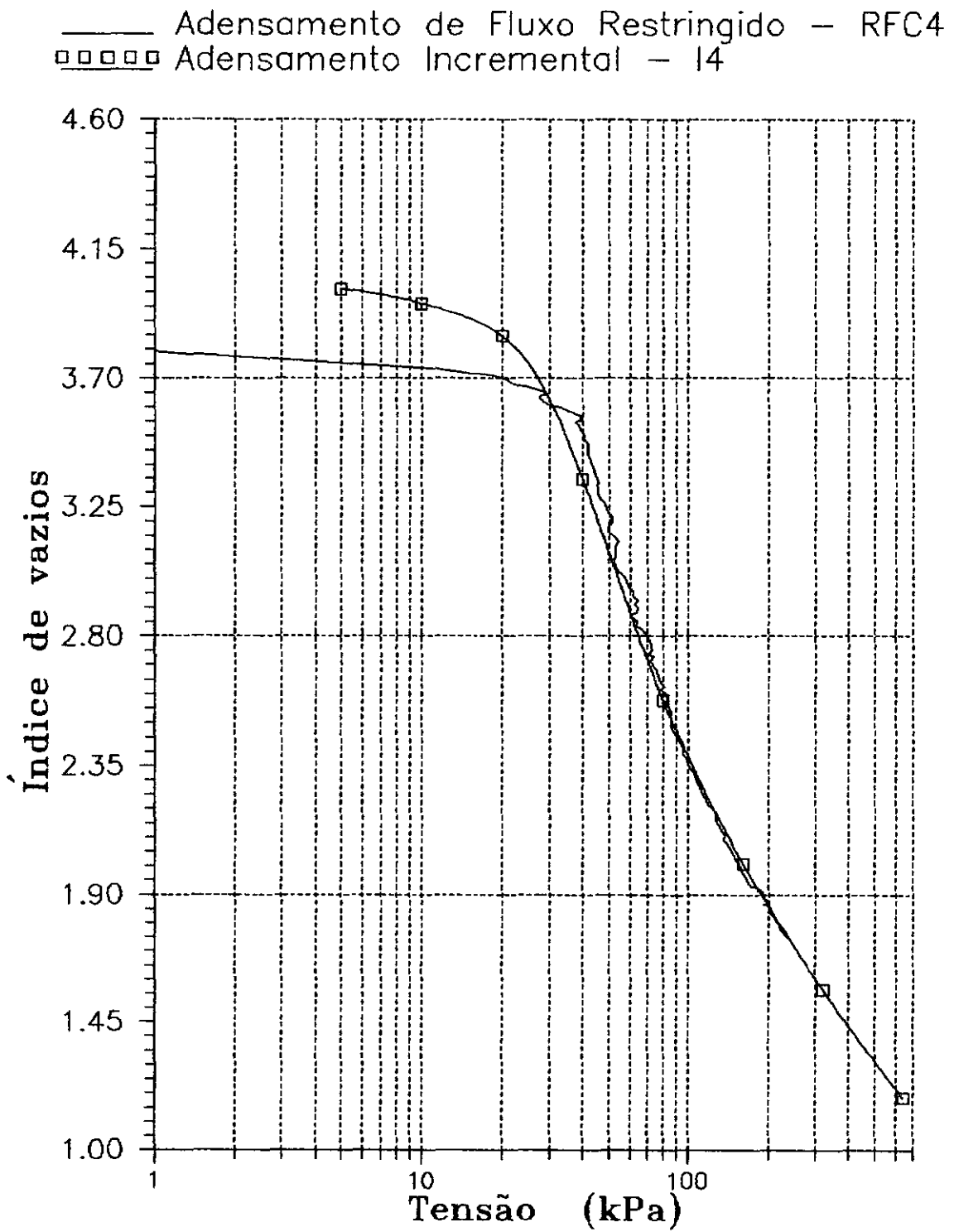
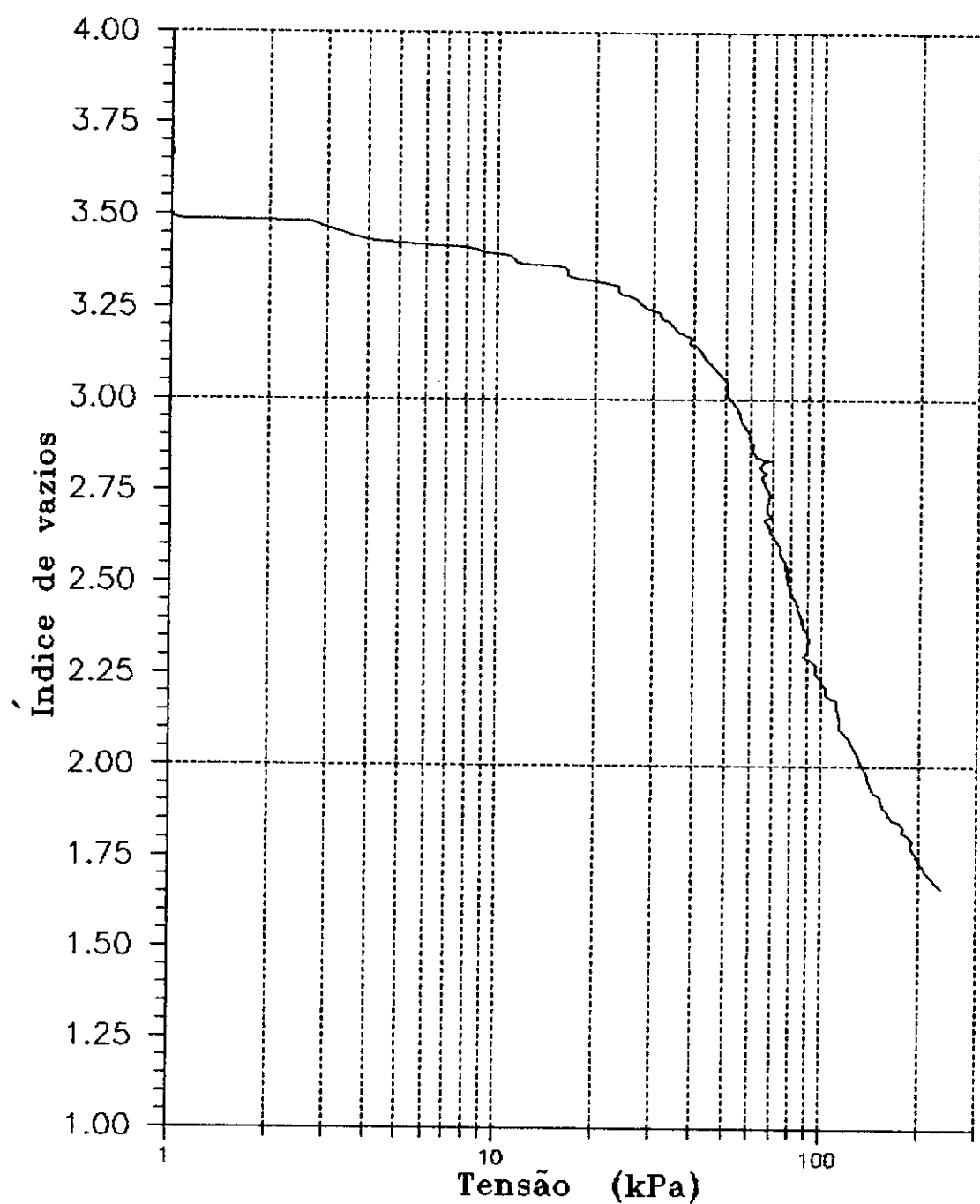


Figura 3.18 - Curva $e : \log \sigma'_v$ - amostra de 5,00 a 5,50 m

— Adensamento com Fluxo Restringido – RFC5



_____ Adensamento de Fluxo Restringido - RFC1
 ☆☆☆☆ Adensamento Incremental - II

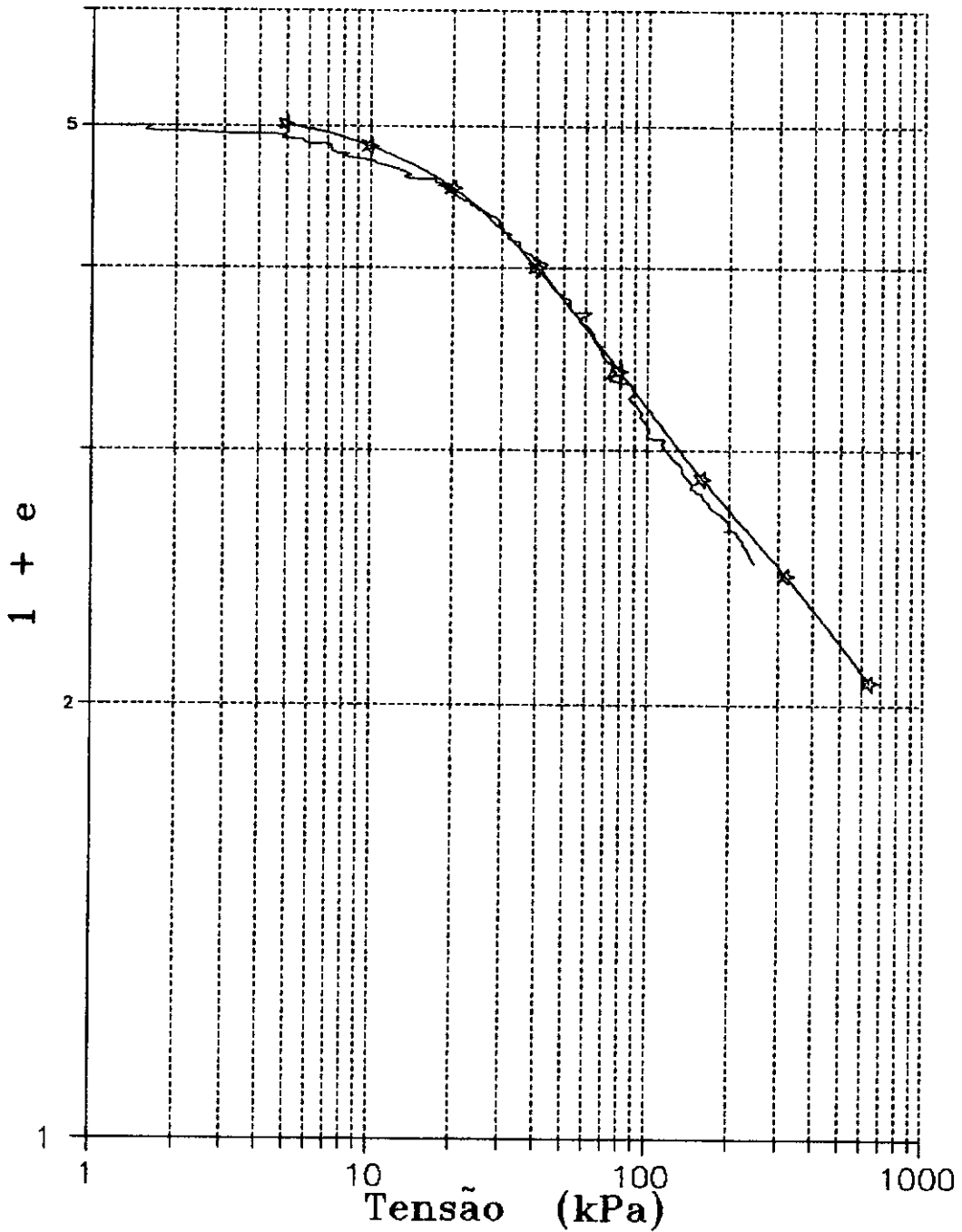


Figura 3.20 - Curva $\log(1 + e) : \log \sigma'_v$ - amostra de 2,00 a 2,50 m

— Adensamento com Fluxo Restringido - RFC2
 ◇◇◇◇ Adensamento Incremental - I2

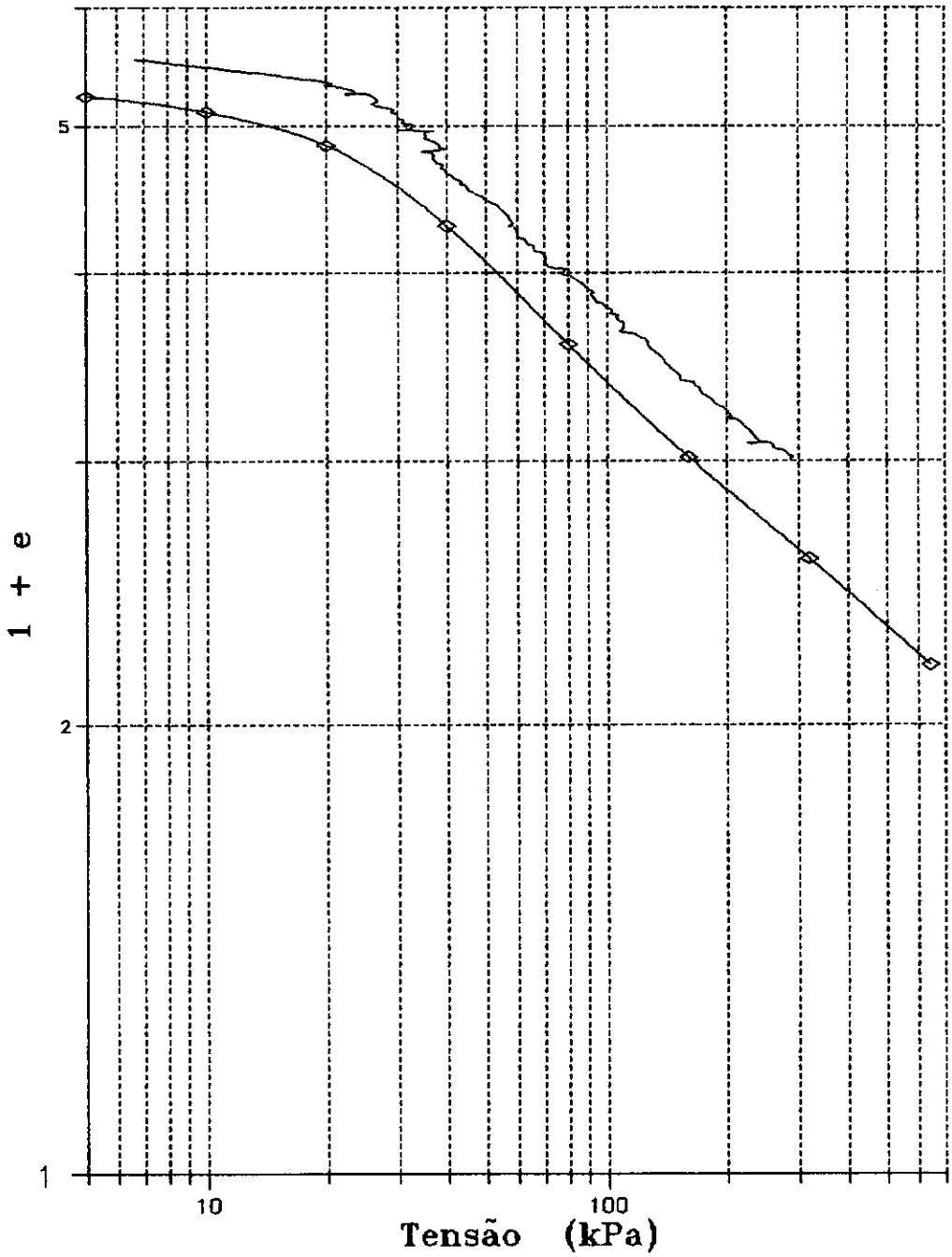


Figura 3.21 - Curva $\log(1 + e) : \log \sigma'_v$ - amostra de 2,50 a 3,00 m

— Adensamento de Fluxo Restringido - RFC3
 ★★★★★ Adensamento Incremental - I3

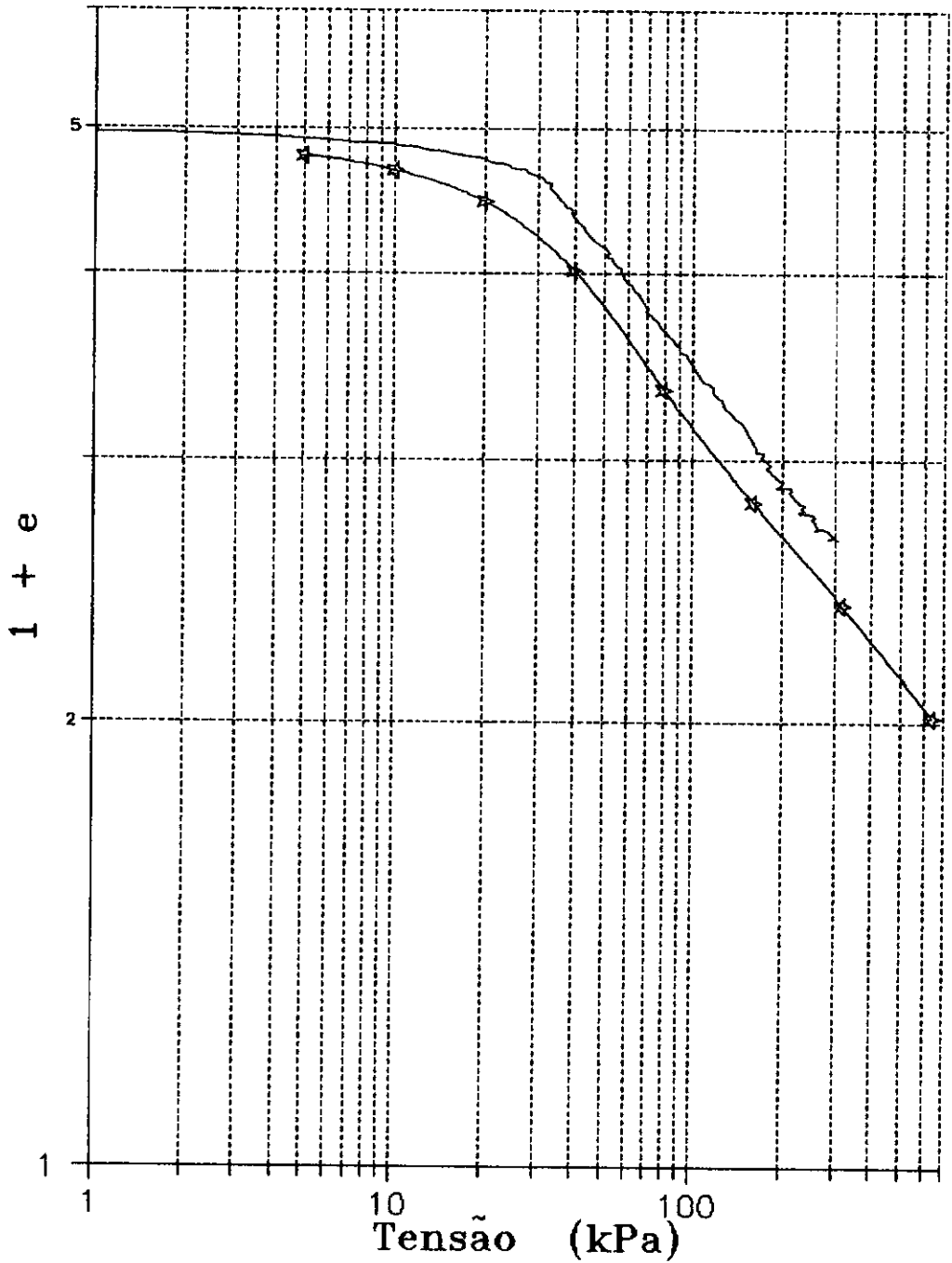


Figura 3.22 - Curva $\log(1 + e) : \log \sigma'_v$ - amostra de 4,00 a 4,50 m

— Adensamento com Fluxo Restringido - RFC4
 ***** Adensamento Incremental - I4

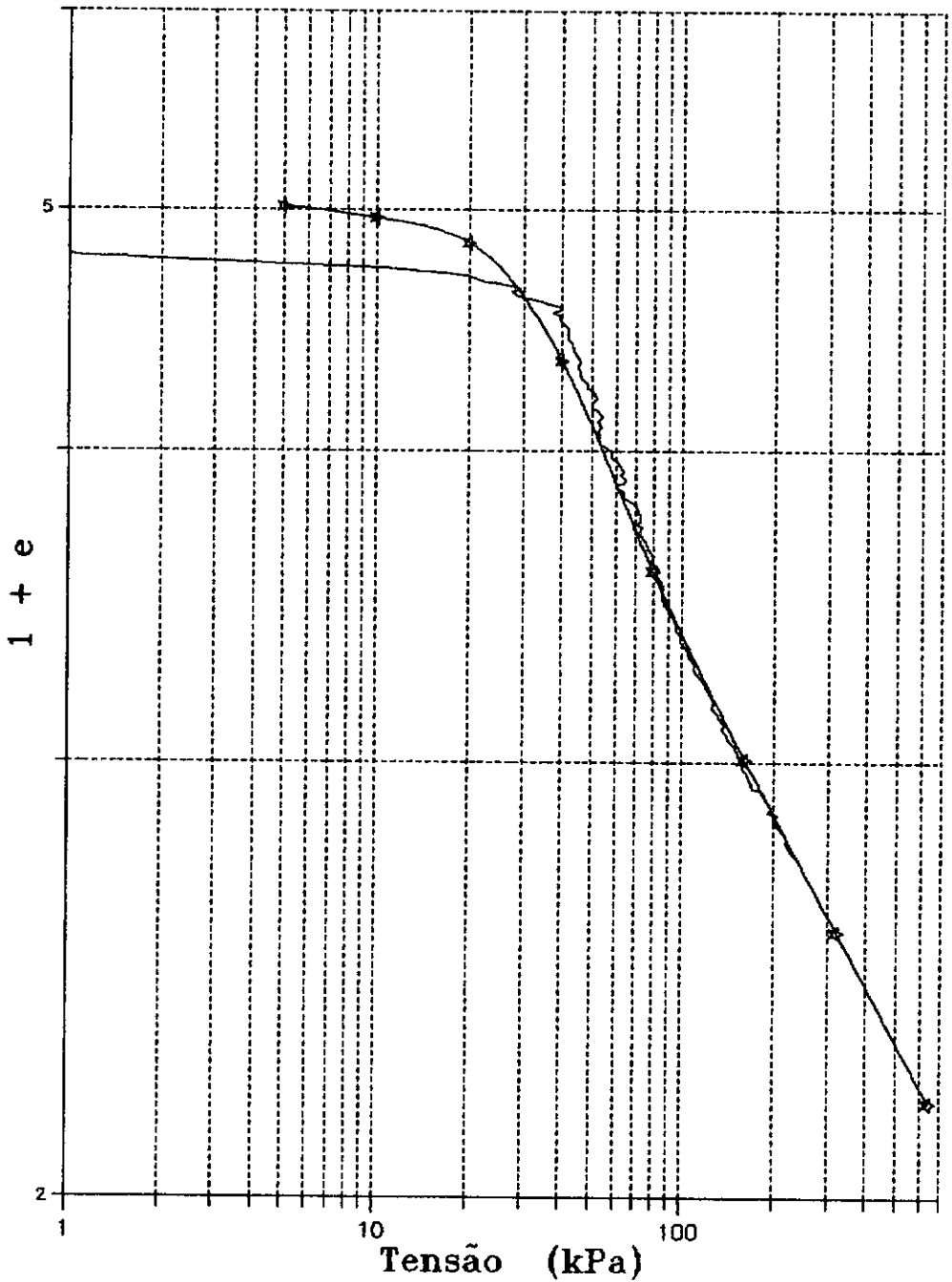


Figura 3.23 - Curva $\log(1 + e) : \log \sigma'_v$ - amostra de 5,00 a 5,50 m

— Adensamento com Fluxo Restringido - RFC5

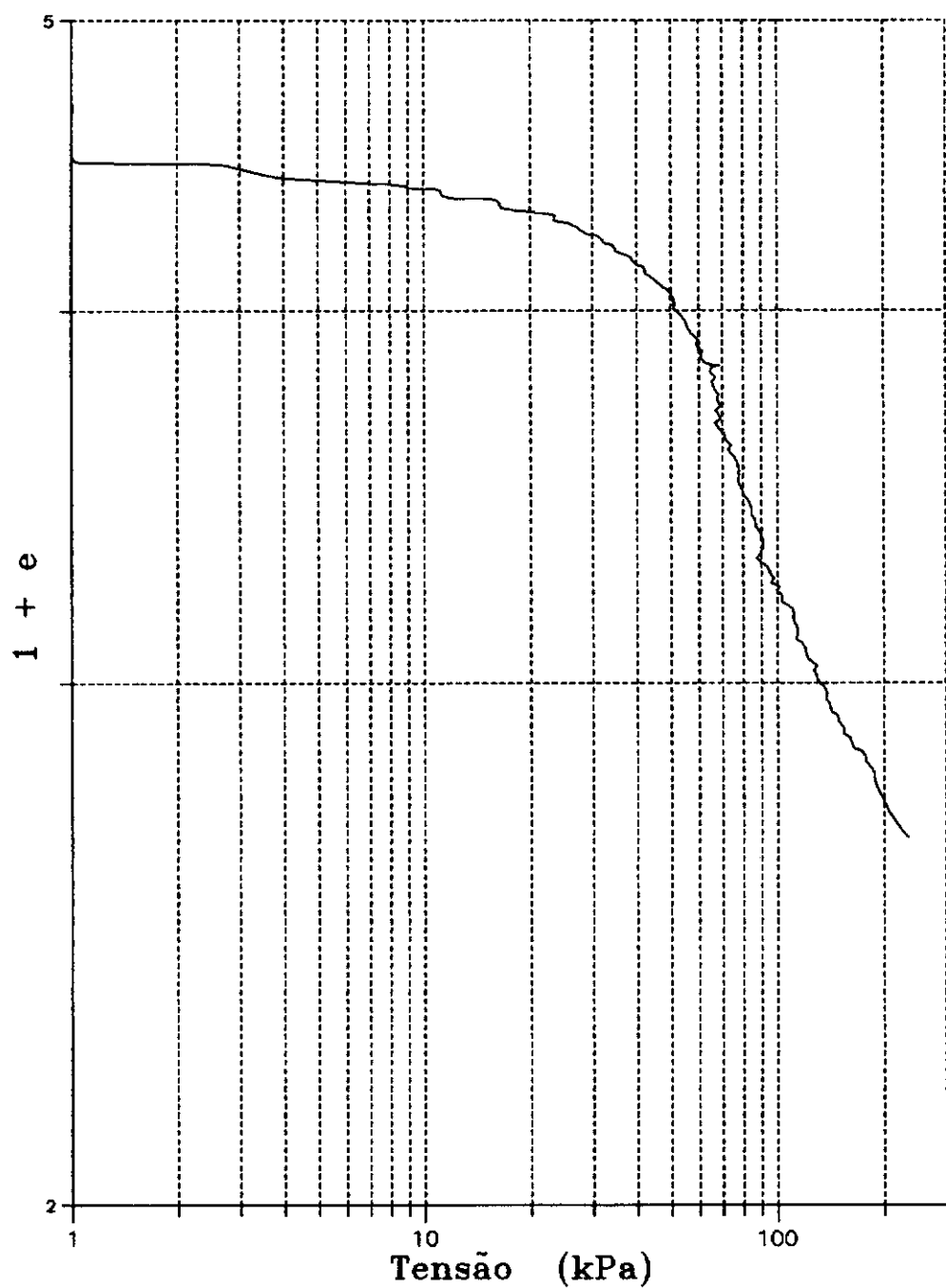


Figura 3.24 - Curva $\log(1 + e) : \log \sigma'_v$ - amostra de 7,00 a 7,50 m

III.4.4 - COEFICIENTE DE ADENSAMENTO.

Head (1986) sugere o uso da equação apresentada por Wissa e outros (1971) para o cálculo do coeficiente de adensamento no ensaio RFC. Entretanto não foi possível um estudo mais detalhado do coeficiente de adensamento uma vez que medidas de tempo, que são imprescindíveis para o seu cálculo, não foram feitas para todos os ensaios. Por outro lado, os valores obtidos de uma tentativa de cálculo do coeficiente de adensamento, utilizando a equação de Wissa e outros (1971) e os resultados provenientes do ensaio em que se realizou leituras de tempo, não se mostraram satisfatórios. Uma das possíveis causas que possa ter produzido a grande dispersão dos valores do coeficiente de adensamento são as oscilações apresentadas pela tensão total e poro pressões, como foi apresentado anteriormente.

III.4.5 - COEFICIENTE DE COMPRESSIBILIDADE VOLUMÉTRICA.

Comparam-se nas figuras 3.25 a 3.28 as curvas m_v : $\log \sigma'_v$ dos ensaios de adensamento incremental e RFC. Na figura 3.29 apresenta-se somente para o ensaio RFC5. Os valores do coeficiente de compressibilidade volumétrica para o ensaio RFC foram calculados com valores obtidos da curva de regressão dos dados de ensaio visto não serem os dados de tensões efetivas sempre crescentes. Estas oscilações nos valores das tensões efetivas se deram devido às oscilações da tensão total conforme anteriormente mencionado.

Estas oscilações nos valores das tensões efetivas produzem uma grande dispersão nos valores de m_v calculados das curvas e : $\log \sigma'_v$ sem regressão. Assim sendo, optou-se pela regressão das curvas e : $\log \sigma'_v$, com um coeficiente de determinação sempre maior que 0,985. Dentre as várias opções de curvas de regressão possíveis, a escolha da curva e : $\log \sigma'_v$ a ser considerada para o cálculo de m_v foi escolhida a sentimento.

Dos dados apresentados pode-se ver que existe uma boa

concordância na forma da curva do gráfico coeficiente de compressibilidade volumétrica : $\log \sigma'_v$ para os ensaios edométricos incrementais e RFC. No entanto, para o trecho de compressão virgem, os valores obtidos dos ensaios RFC ligeiramente superiores àqueles obtidos dos ensaios incrementais.

III.4.6 - MÓDULO EDMÉTRICO.

Para que se possa utilizar o método proposto por Janbu (1969), os valores do módulo edométrico E_{ed} versus σ'_v para o ensaio RFC são apresentados nas figuras 3.30 a 3.34. Janbu (1969) enuncia que a inclinação da curva $E_{ed} : \sigma'_v$ para tensões maiores que a tensão de pré-adensamento é constante, contudo somente para a profundidade de 4,00 m a 4,50 m este fato foi observado. Para as demais profundidades, o efeito da curvatura na curva módulo oedométrico : σ'_v se tornava mais pronunciado com o aumento da profundidade.

— Adensamento de Fluxo Restringido - RFC1
 ★★★★★ Adensamento Incremental - I1

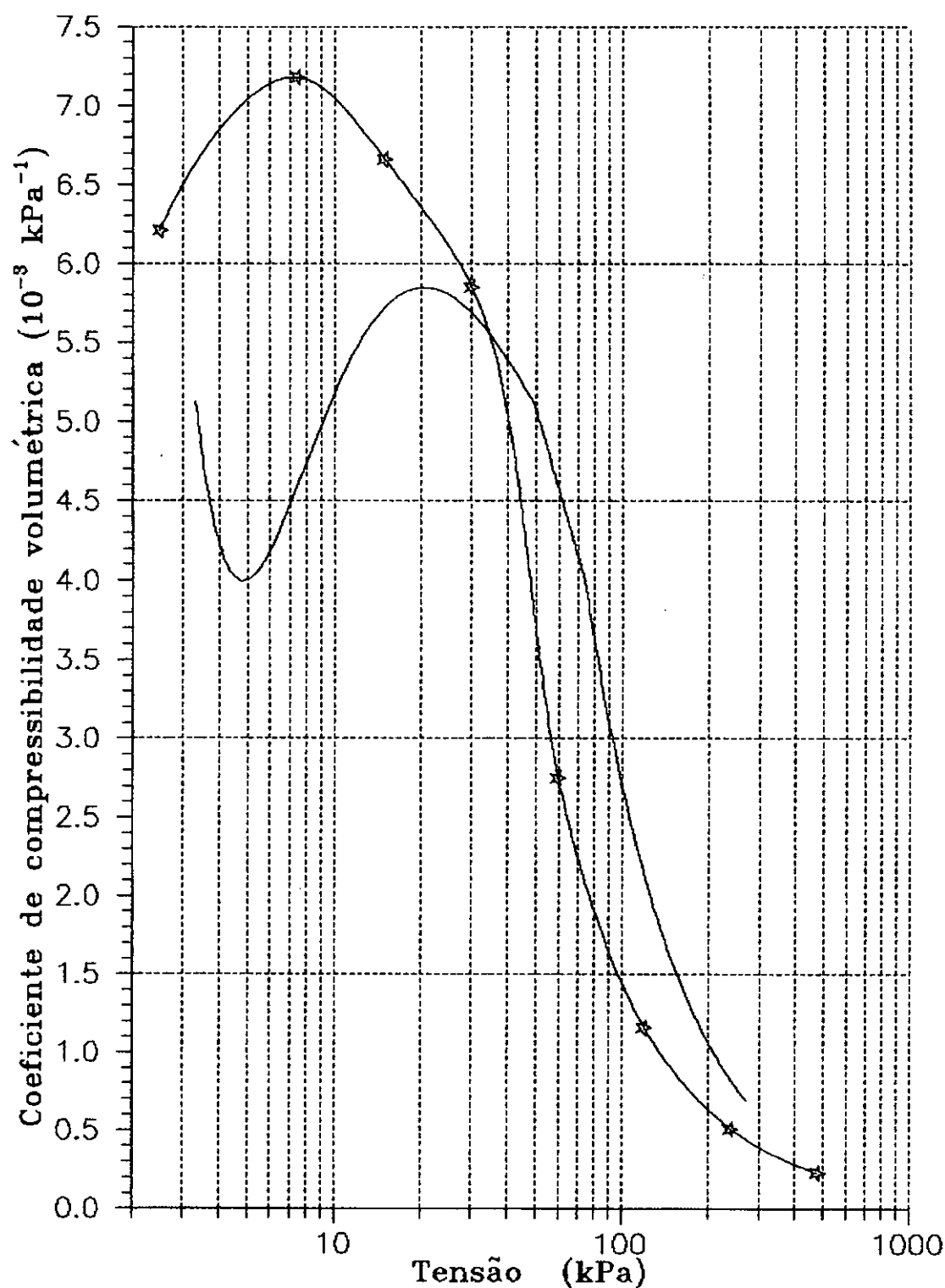


Figura 3.25 - Curva $m_v : \log \sigma'_v$ - amostra de 2,00 a 2,50 m

— Adensamento com Fluxo Restringido - RFC2
***** Adensamento Incremental - I2

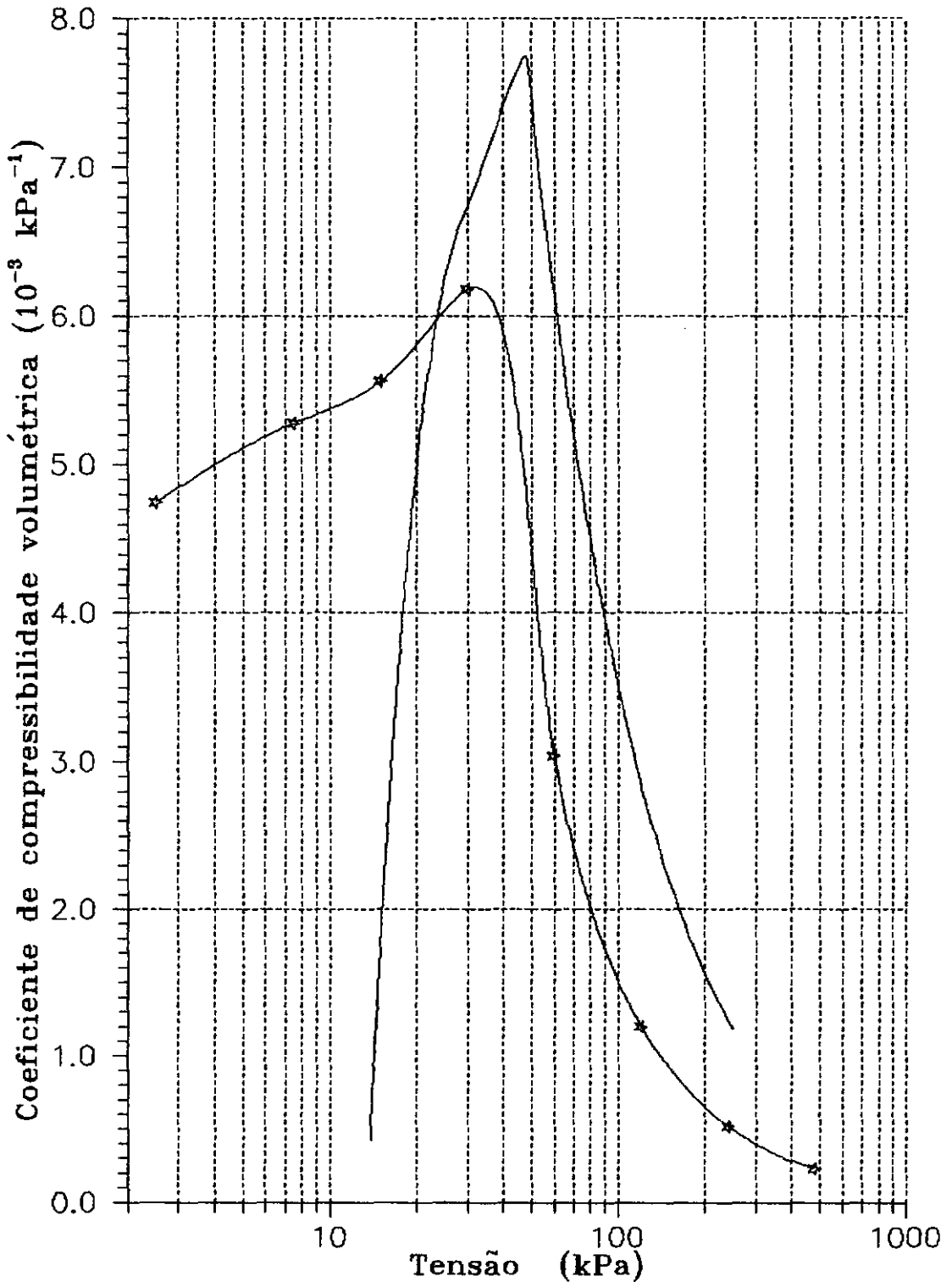


Figura 3.26 - Curva $m_v : \log \sigma'_v$ - amostra de 2,50 a 3,00 m

— Adensamento com Fluxo Restringido - RFC3
***** Adensamento Incremental - I3

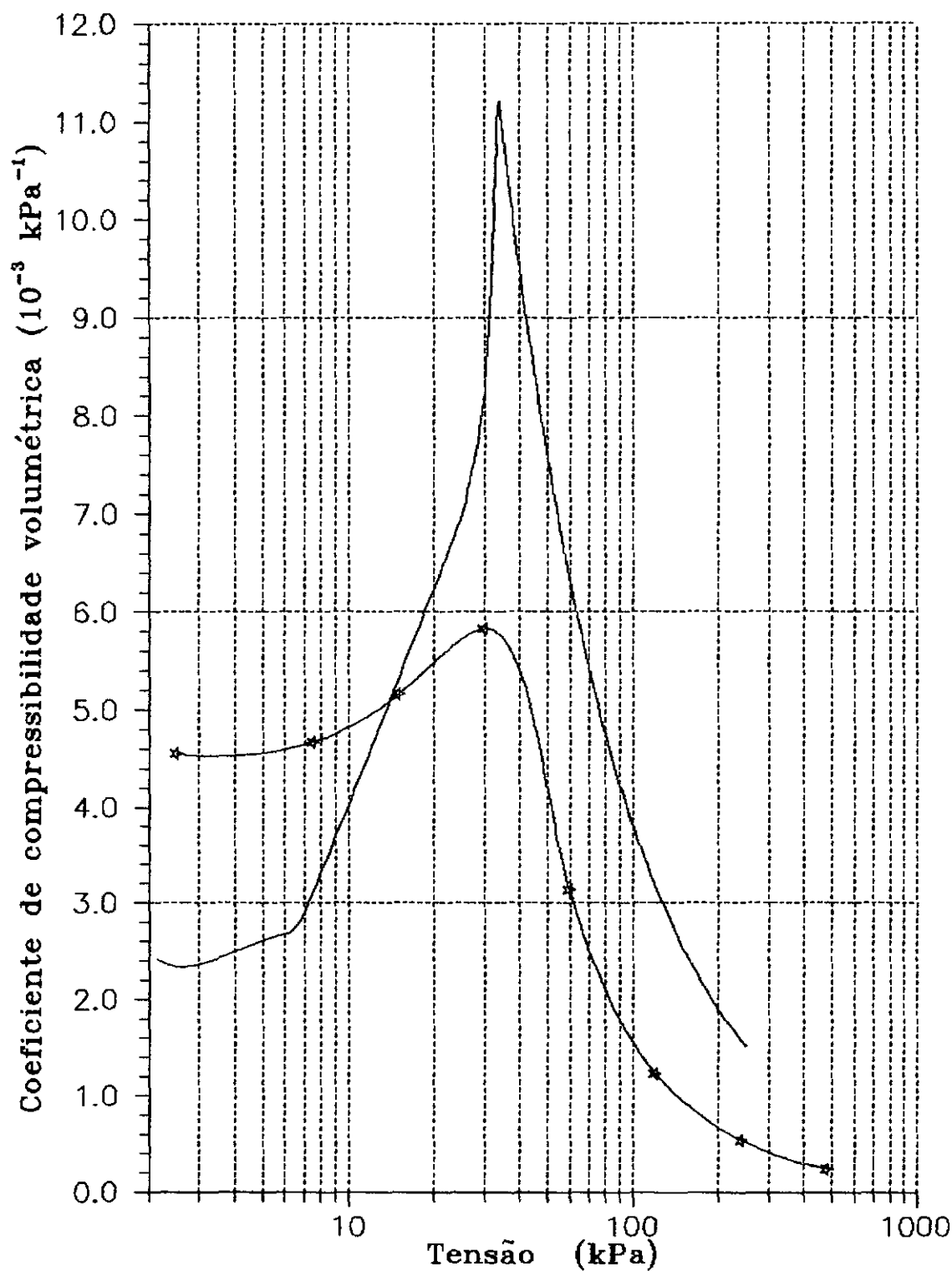


Figura 3.27 - Curva m_v : $\log \sigma'_v$ - amostra de 4,00 a 4,50 m

— Adensamento de Fluxo Restringido - RFC4
 ***** Adensamento Incremental - I4

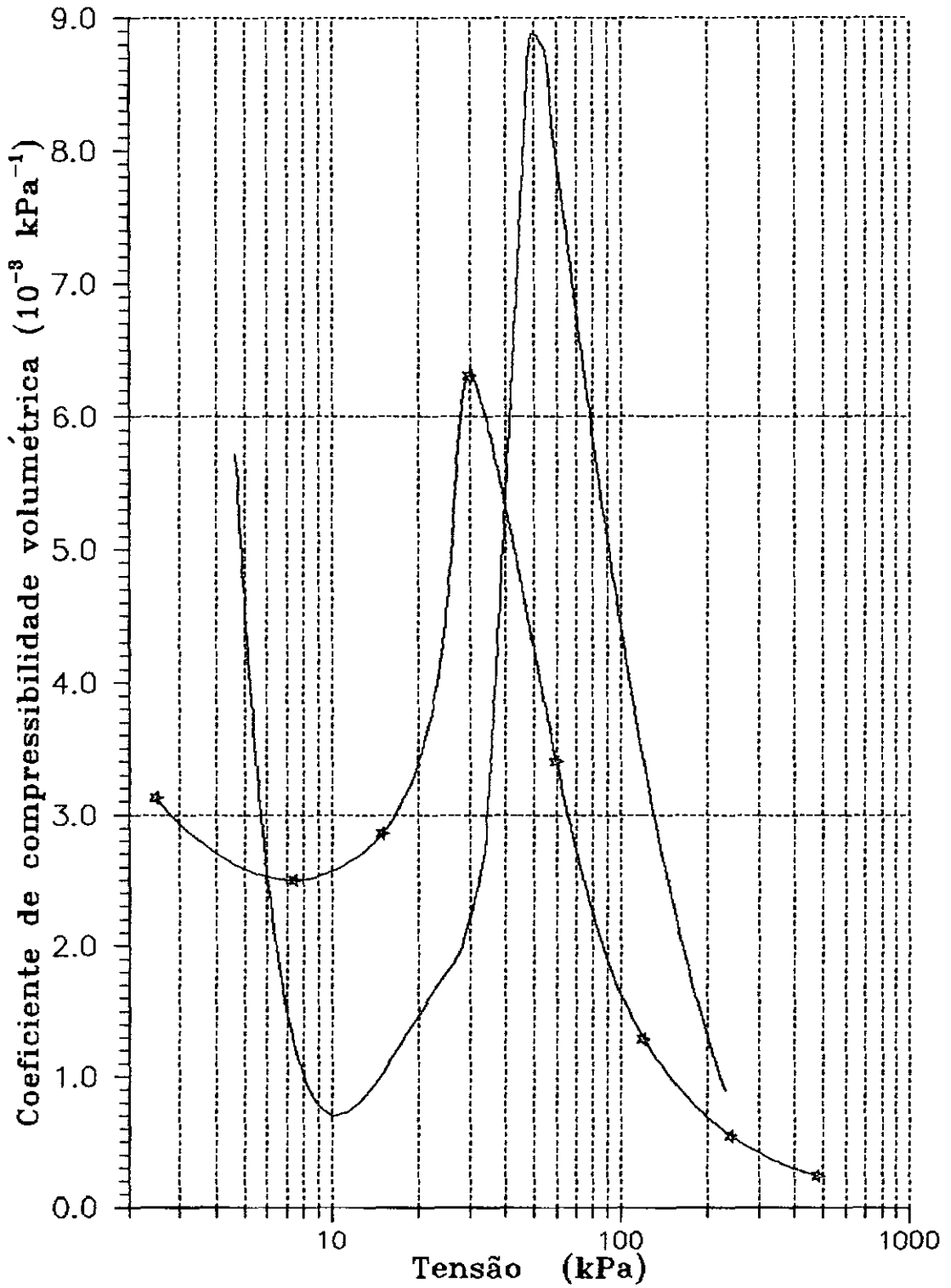


Figura 3.28 - Curva $m_v : \log \sigma'_v$ - amostra de 5,00 a 5,50 m

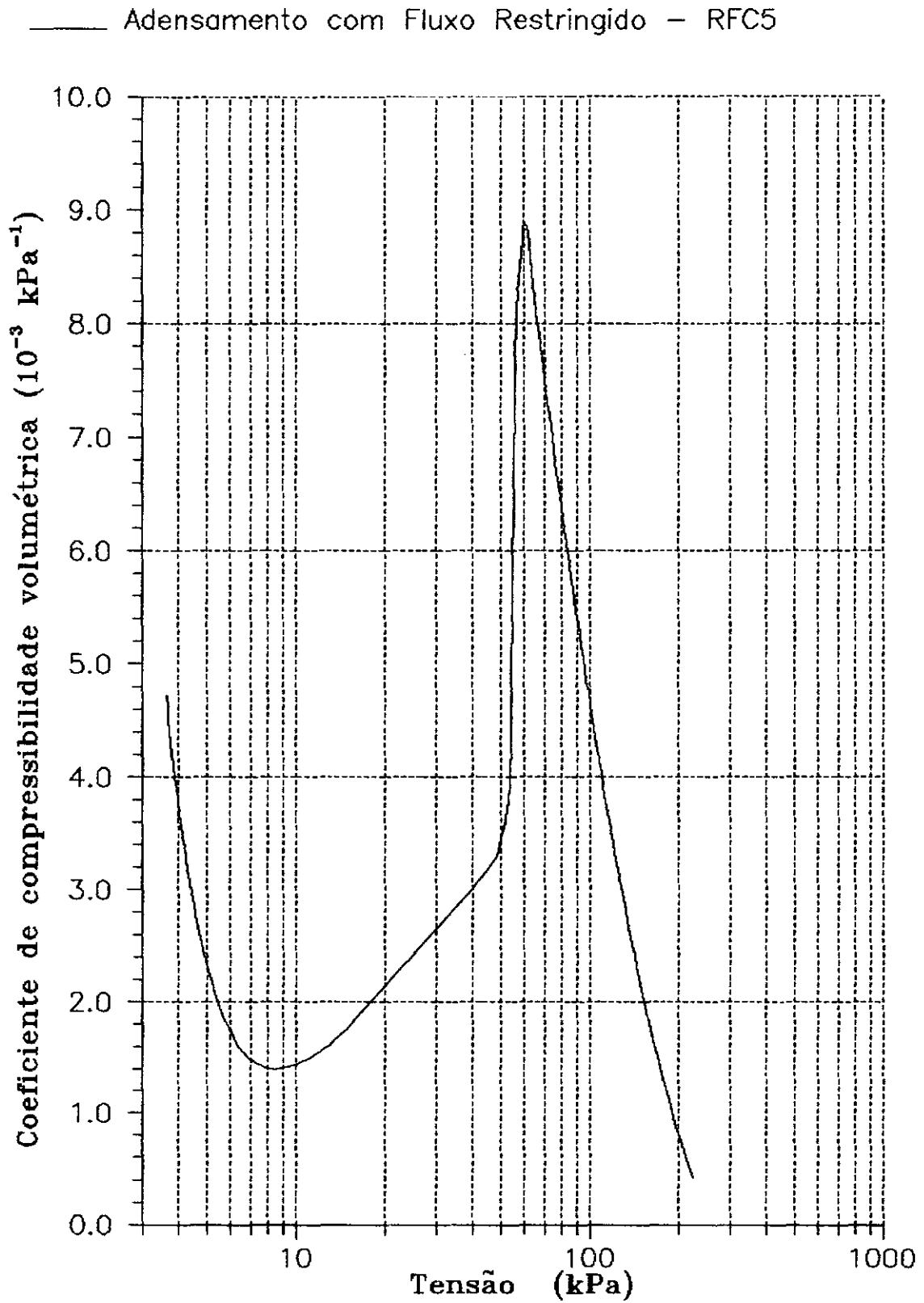


Figura 3.29 - Curva $m_v : \log \sigma'_v$ - amostra de 7,00 a 7,50 m

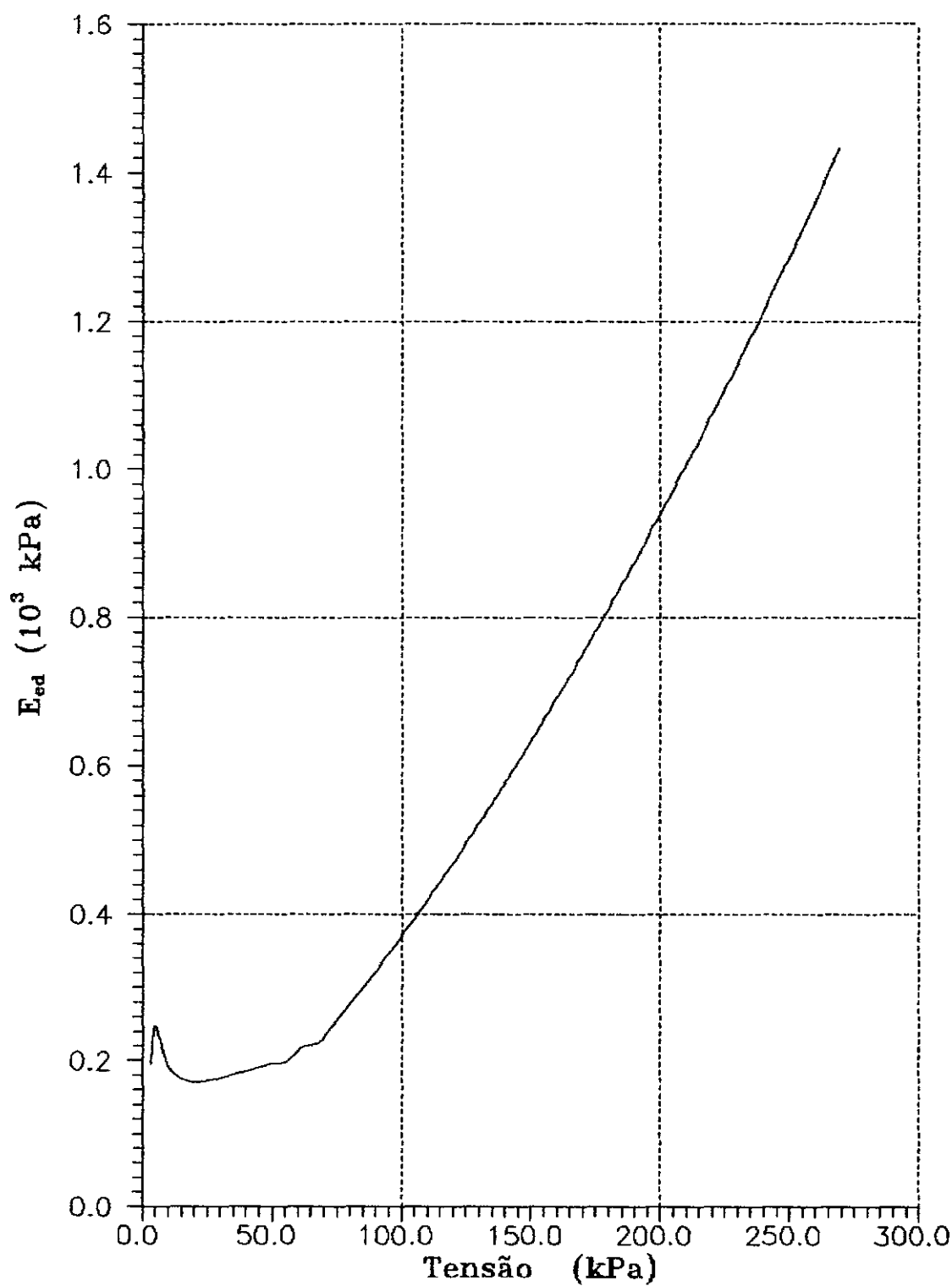


Figura 3.39 - Curva E_{od} : σ'_v - amostra de 2,00 a 2,50 m

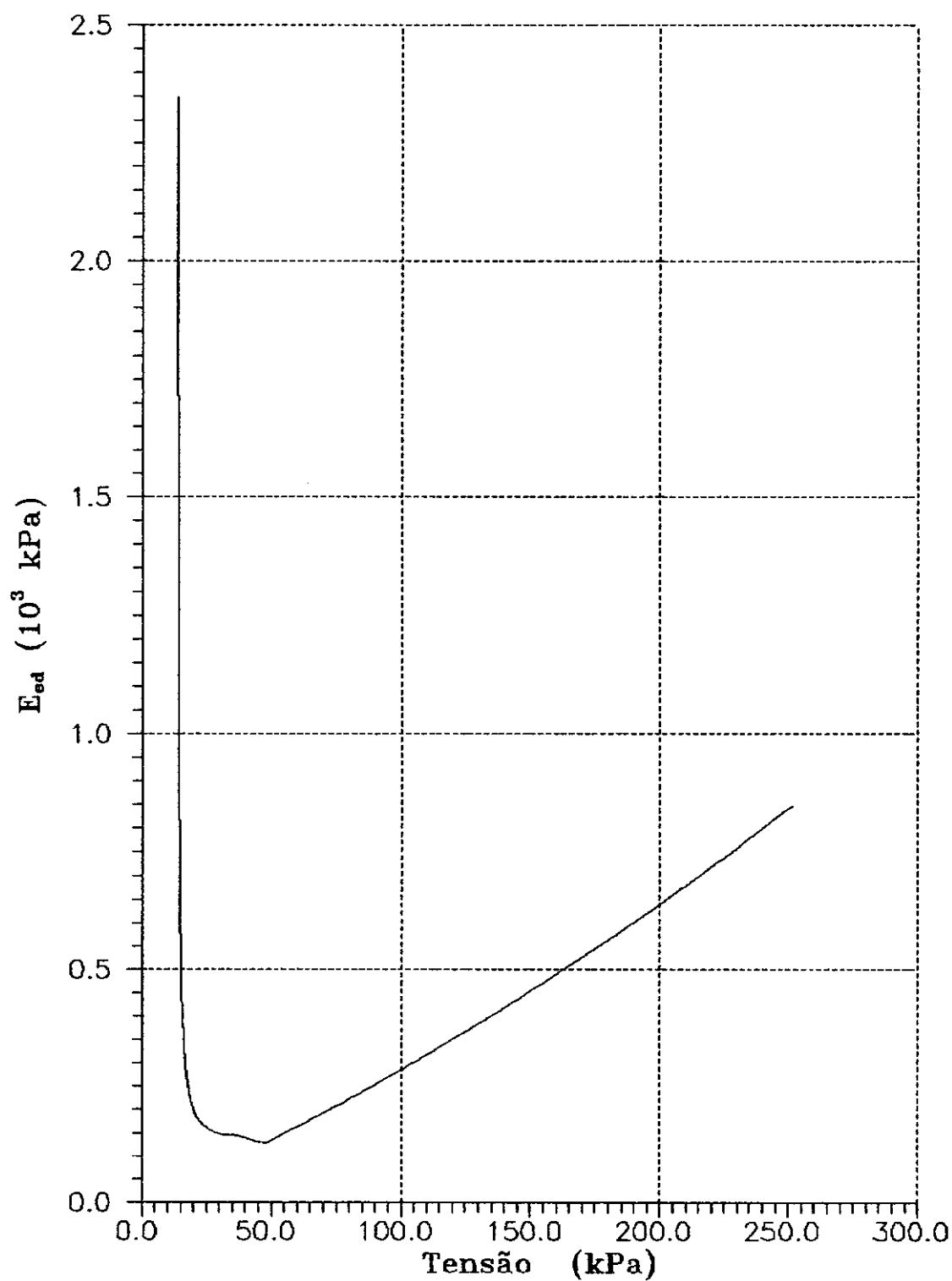


Figura 3.31 - Curva E_{od} : σ'_v - amostra de 2,50 a 3,00 m

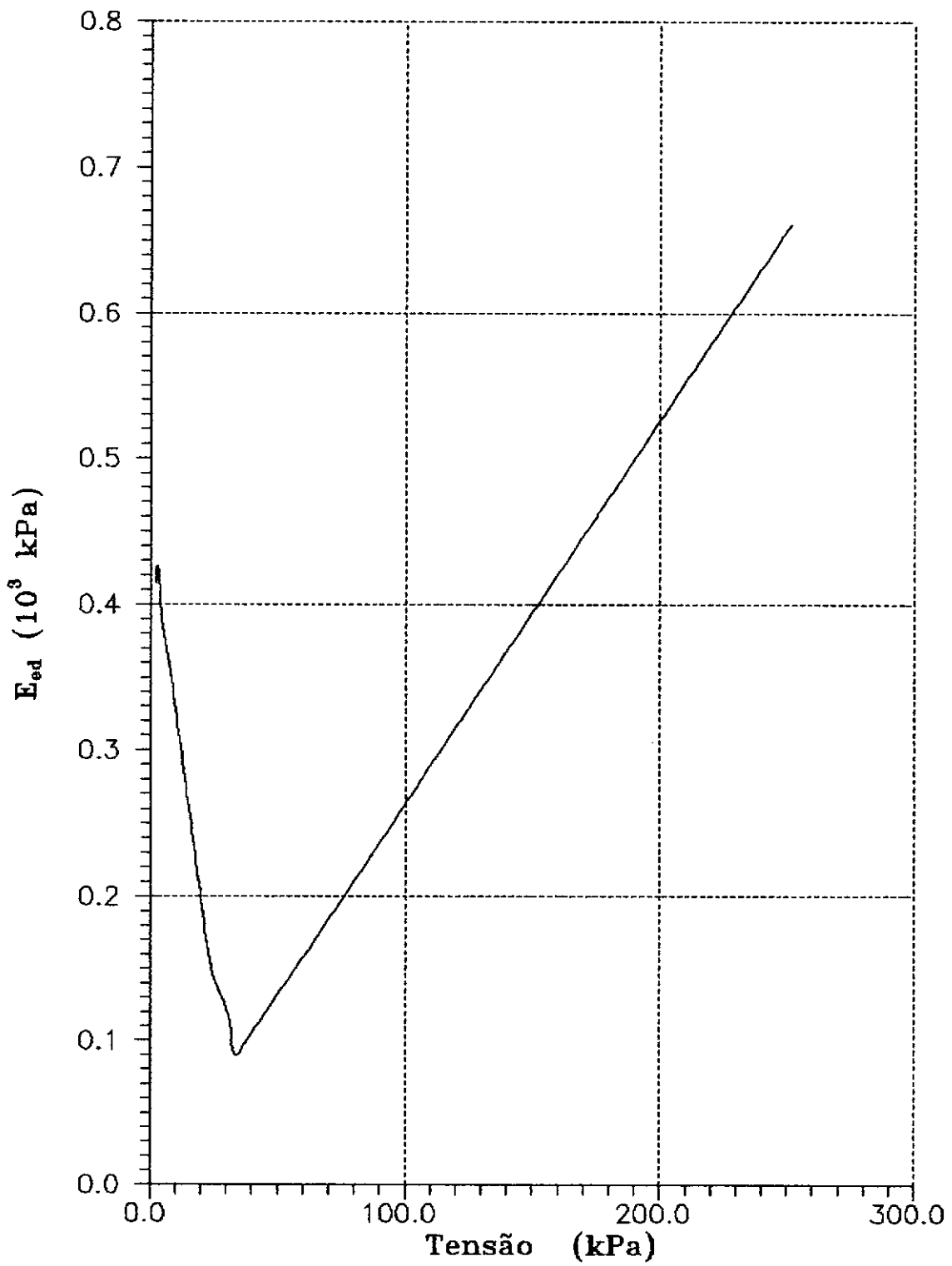
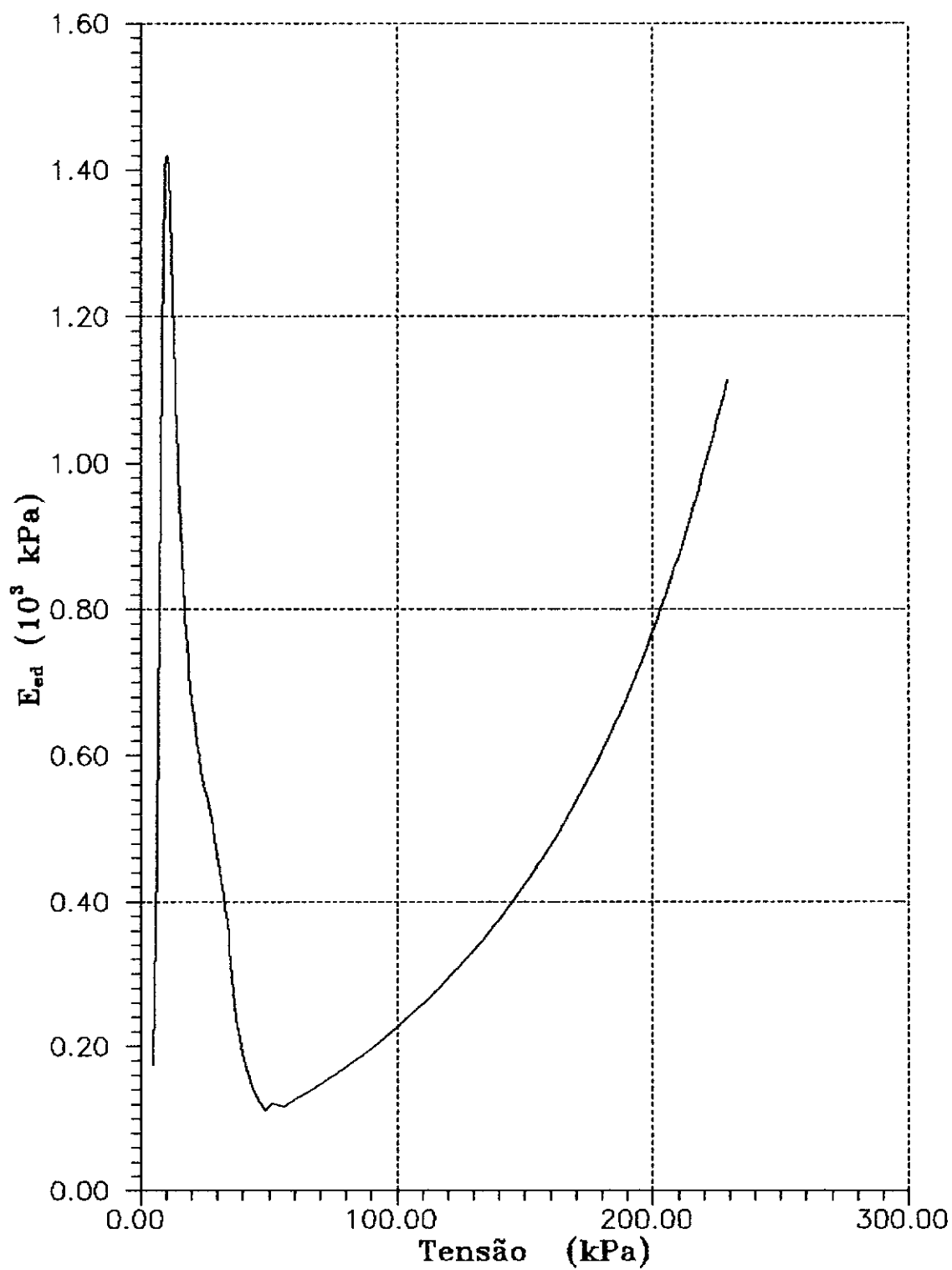


Figura 3.32 - Curva E_{od} : σ'_v - amostra de 4,00 a 4,50 m



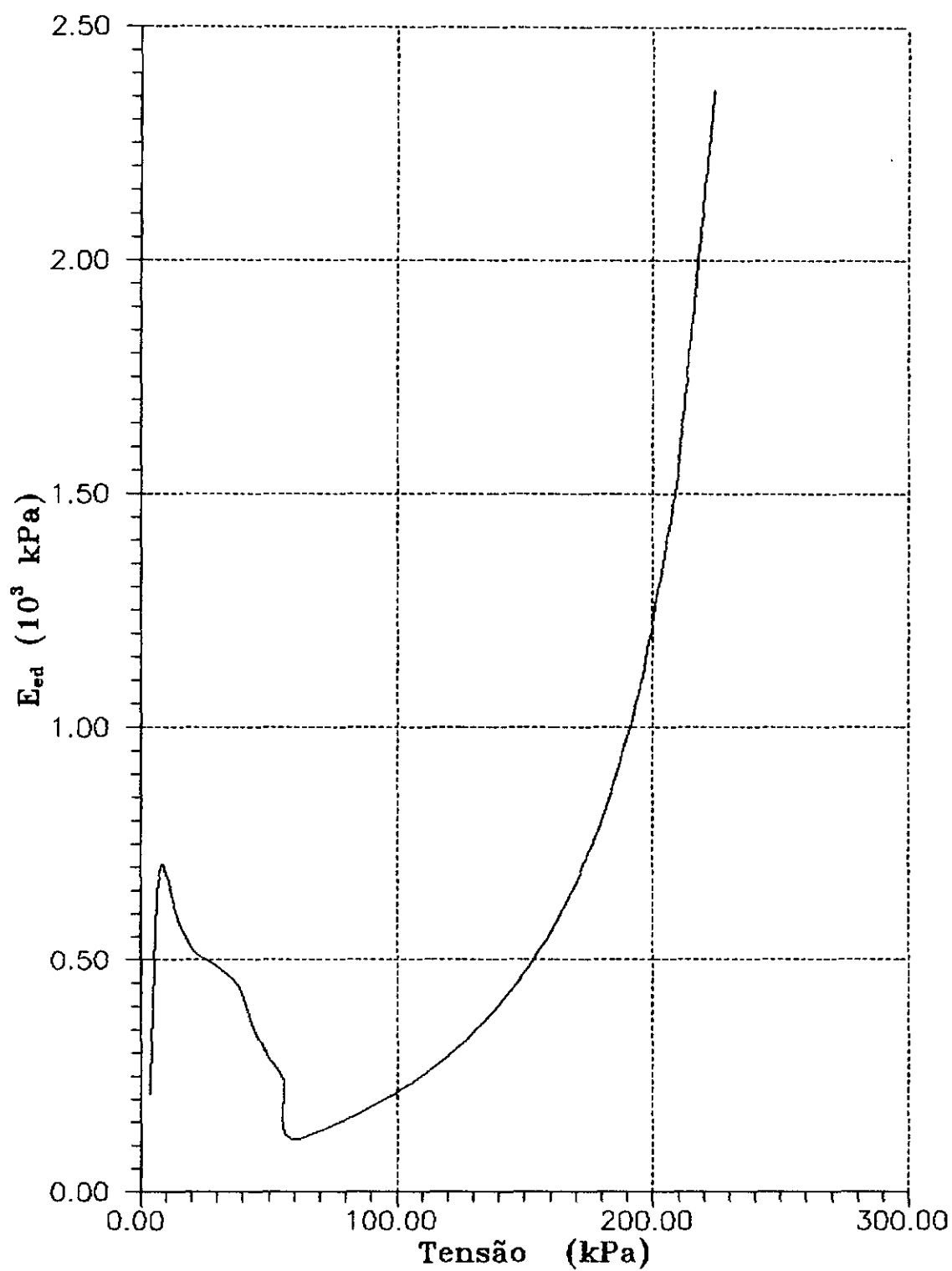


Figura 3.34 - Curva E_{od} : σ'_v - amostra de 7,00 a 7,50 m

III.4.7 - TENSÃO DE PRÉ-ADENSAMENTO.

A tabela 3.2 e a figura 3.25 apresentam os valores de tensão de pré-adensamento para os ensaios RFC nas diversas profundidades calculados pelos métodos Pacheco Silva, Casagrande, Pacheco Silva modificado e Janbu. Na tabela 3.3 e na figura 3.26 os valores de tensão de pré-adensamento calculados pelo método de Casagrande para os ensaios RFC e incremental são apresentados. Pode-se ver como nos ensaios incrementais, os valores de σ'_{vm} calculados pelo método de Pacheco Silva modificado se apresentam mais próximos aos valores calculados pelo método de Casagrande. Também pode-se dizer que os valores de σ'_{vm} obtidos dos ensaios RFC se apresentam consoantes com os obtidos pelo ensaio incremental.

Tabela 3.2 - Tensão de Pré-adensamento (kPa).

Ensaio	Profundidade (m)	Pacheco Silva	Casagrande	Pacheco Silva modificado	Janbu
RFC1	2,00 a 2,50	16,0	20,5	18,0	21,0
RFC2	2,50 a 3,00	17,5	18,0	22,0	48,0
RFC3	4,00 a 4,50	26,0	29,0	28,5	34,0
RFC4	5,00 a 5,50	34,0	36,0	35,0	50,0
RFC5	7,00 a 7,50	48,0	53,0	50,0	60,0

***** Pacheco Silva
 >>>>> Casagrande
 □□□□□ Pacheco Silva modificado
 ***** Janbu

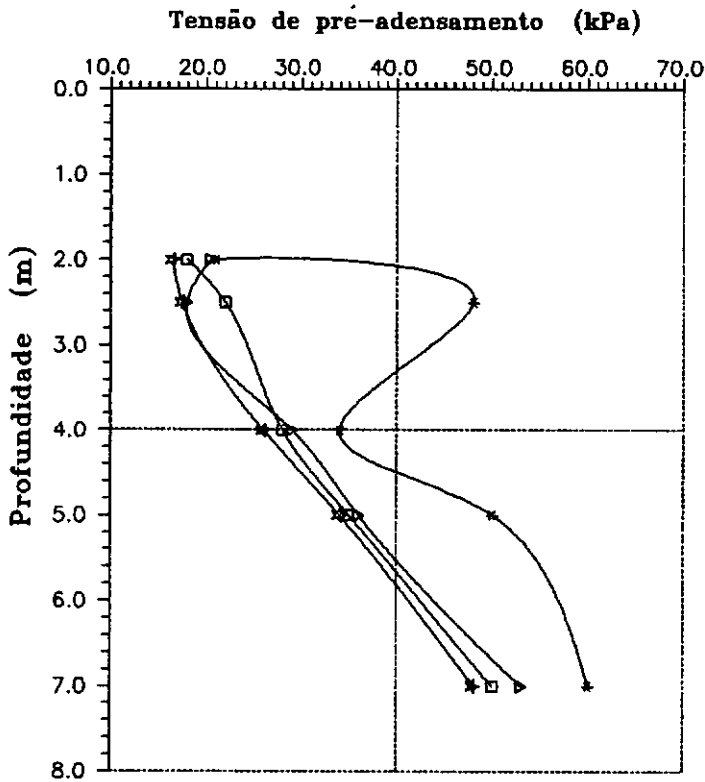


Figura 3.35 - Curva σ'_{vm} versus Profundidade, adensamento RFC.

Tabela 3.2 - Tensão de pré-adensamento (kPa) calculada pelo método de Casagrande.

Profundidade (m)	Incremental	RFC
2,00 a 2,50	17,5	20,5
2,50 a 3,00	19,0	18,0
4,00 a 4,50	26,0	29,0
5,00 a 5,50	26,0	36,0

**** Adensamento Incremental
 ooooo Adensamento com Fluxo Restringido

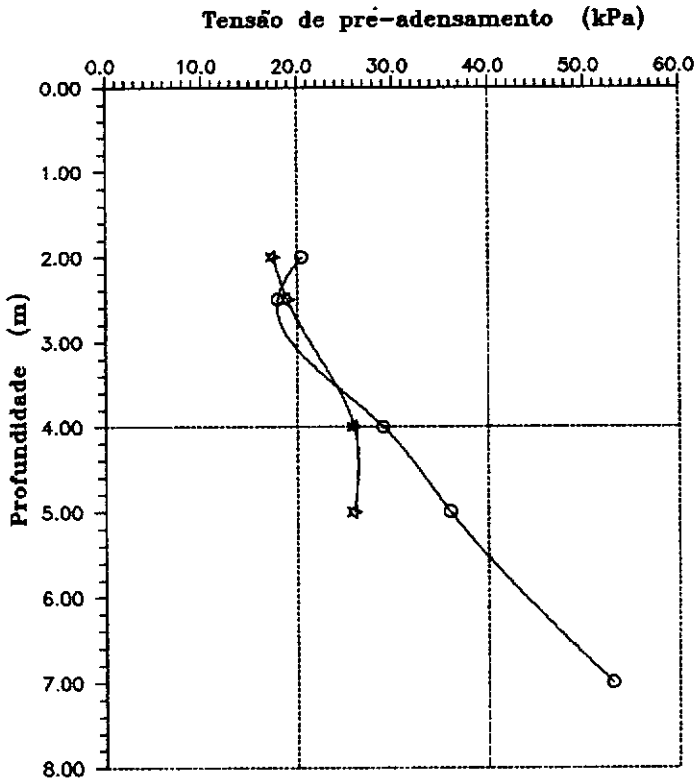


Figura 3.36 - Curva σ'_{vm} : Profundidade para os ensaios Incremental e RFC, Método de Casagrande.

III.5 - CONCLUSÕES PARCIAIS.

Analisando os dados apresentados neste capítulo pode-se observar que:

-As curvas e : $\log \sigma'_v$ obtidas pelo ensaio RFC apresentam-se razoavelmente concordantes com as obtidas no ensaio incremental.

-A utilização da curva $\log(1 + e) : \log \sigma'_v$ - não

lineariza o trecho de compressão virgem para os ensaios RFC4 e RFC5.

- Os valores de σ'_{vm} obtidos do ensaio RFC são superiores aos obtidos pelo ensaio incremental, sendo esta diferença mais acentuada principalmente a maiores profundidades.
- Os valores de σ'_{vm} obtidos pelos métodos de Pacheco Silva, Casagrande e Pacheco Silva modificado apresentam-se concordantes, enquanto que aqueles obtidos pelo método de Janbu são sensivelmente superiores aos demais.
- As curvas $m_v : \sigma'_v$ para o ensaio RFC mostraram razoavelmente concordantes com as do ensaio incremental, embora os valores para o ensaio RFC se apresentem maiores.

IV - ENSAIO DE ADENSAMENTO K_o

IV.1 - INTRODUÇÃO.

Este capítulo apresenta uma revisão dos vários tipos de equipamentos utilizados para a realização do ensaio triaxial K_o , e apresenta uma nova célula desenvolvida no Laboratório de Geotecnia do Programa de Engenharia Civil da COPPE.

IV.2 - O ENSAIO K_o .

IV.2.1 - PRINCÍPIO DO ENSAIO.

O ensaio triaxial é utilizado com o objetivo de fornecer parâmetros de resistência e de deformabilidade dos solos em laboratório. Estes parâmetros para serem representativos do comportamento do solo *in situ* deveriam ser determinados a partir do estado de tensões geostático de campo. O estado geostático de tensões é aquele em que as deformações laterais são nulas, sendo a relação entre as tensões efetivas verticais σ'_v e horizontais σ'_h representada por:

$$K_o = \frac{\sigma'_h}{\sigma'_v} \quad (4.1)$$

onde K_o é o coeficiente de empuxo no repouso.

O ensaio de adensamento K_o , ou simplesmente K_o , é aquele no qual as tensões são controladas, durante a fase de adensamento, de modo a não se permitir deformações laterais, e o valor de K_o é medido durante o ensaio.

Em todas as modalidades de ensaio K_o , necessário se faz que durante a realização do ensaio seja controlada, além da

deformação lateral, a variação de volume ou a variação do diâmetro do corpo de prova, para se garantir a não deformação lateral.

IV.2.2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.

Bishop (1950), citado por Huang (1986), utiliza uma bureta para o acompanhamento da variação volumétrica do corpo de prova durante o ensaio em amostras saturadas. Já para solos parcialmente saturados, é utilizado um medidor de deformação lateral em forma de anel que indica possíveis variações do diâmetro à altura média do corpo de prova (Bishop e Henkel, 1962). Em ambas situações a pressão confinante é ajustada para não se permitir deformações laterais.

Chapmann (1979) cita ainda uma outra modalidade de célula triaxial K_0 em que as medidas de deformação lateral são realizadas por um transdutor de deslocamento conectado a um anel que envolve o corpo de prova.

Os medidores de deslocamento citados acima, além de só determinarem a mudança de diâmetro em uma única seção transversal do corpo de prova também produzem algum esforço lateral no mesmo.

Uma técnica mais aprimorada deveria acompanhar a mudança da seção transversal ao longo de toda altura do corpo de prova sem exercer nenhuma restrição ao corpo de prova. Um meio para isto, em solos saturados, é o acompanhamento da variação de volume de toda a amostra, quer seja pelo volume de água que drena do corpo de prova ou pela variação do volume de água confinante na célula.

Davis e Poulos (1963) desenvolveram uma célula triaxial K_0 fabricada em aço inoxidável com espessura das paredes de 9,53 mm. Esta célula tem a particularidade que o diâmetro do pistão de carregamento é igual ao diâmetro do corpo de prova, como apresentada pela figura 4.1. A célula aqui desenvolvida baseia-se nesta célula.

Campanella e Vaid (1972) apresentam uma outra célula com o mesmo princípio da célula de Davis e Poulos (1963),

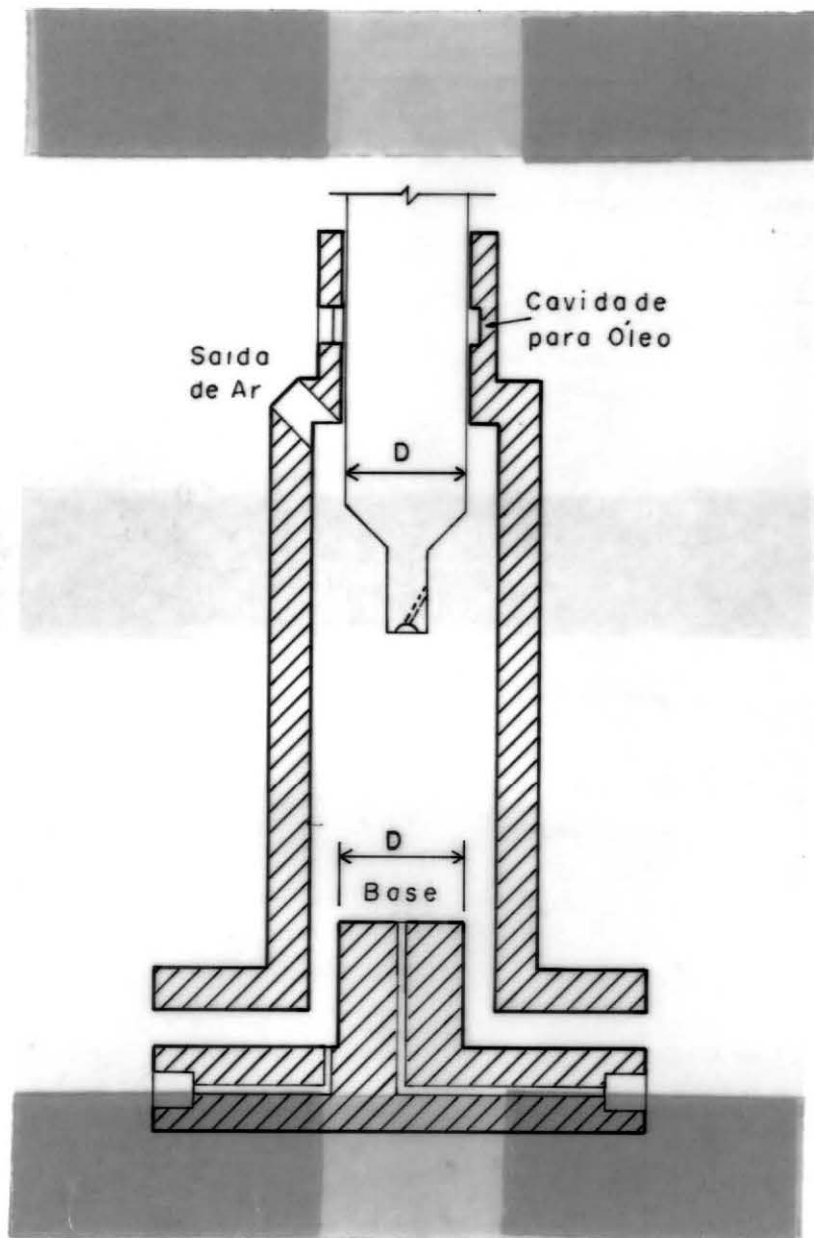


Figura 4.1 - Célula K₀ (Davis e Poulos, 1963).

mas que se diferencia desta pelo sistema de vedação da célula. A célula de Davis e Poulos (1963) apresenta uma cavidade que contém óleo para aplicação de contra pressão que impede o vazamento da água da célula. Na célula de Campanella e Vaid (1972) a vedação é feita através de uma membrana flexível de borracha ligada ao pistão e a célula.

Saada (1970) apresenta um procedimento para a realização de um ensaio triaxial com adensamento K₀ em que a relação volume de água drenada do corpo de prova pela

deformação vertical é mantida constante e igual à área da secção transversal do corpo de prova durante todo o ensaio. Quando ocorre uma tendência de redução nesta relação, o sistema pneumático controlador da pressão confinante é acionado automaticamente, aumentando a pressão confinante, e desligando quando a relação citada acima aumenta.

Chapman (1979) apresenta uma célula triaxial K_0 na qual se faz o acompanhamento da variação de volume total do corpo de prova para amostra de areia seca, apresentada pela figura 4.2 e descrita abaixo.

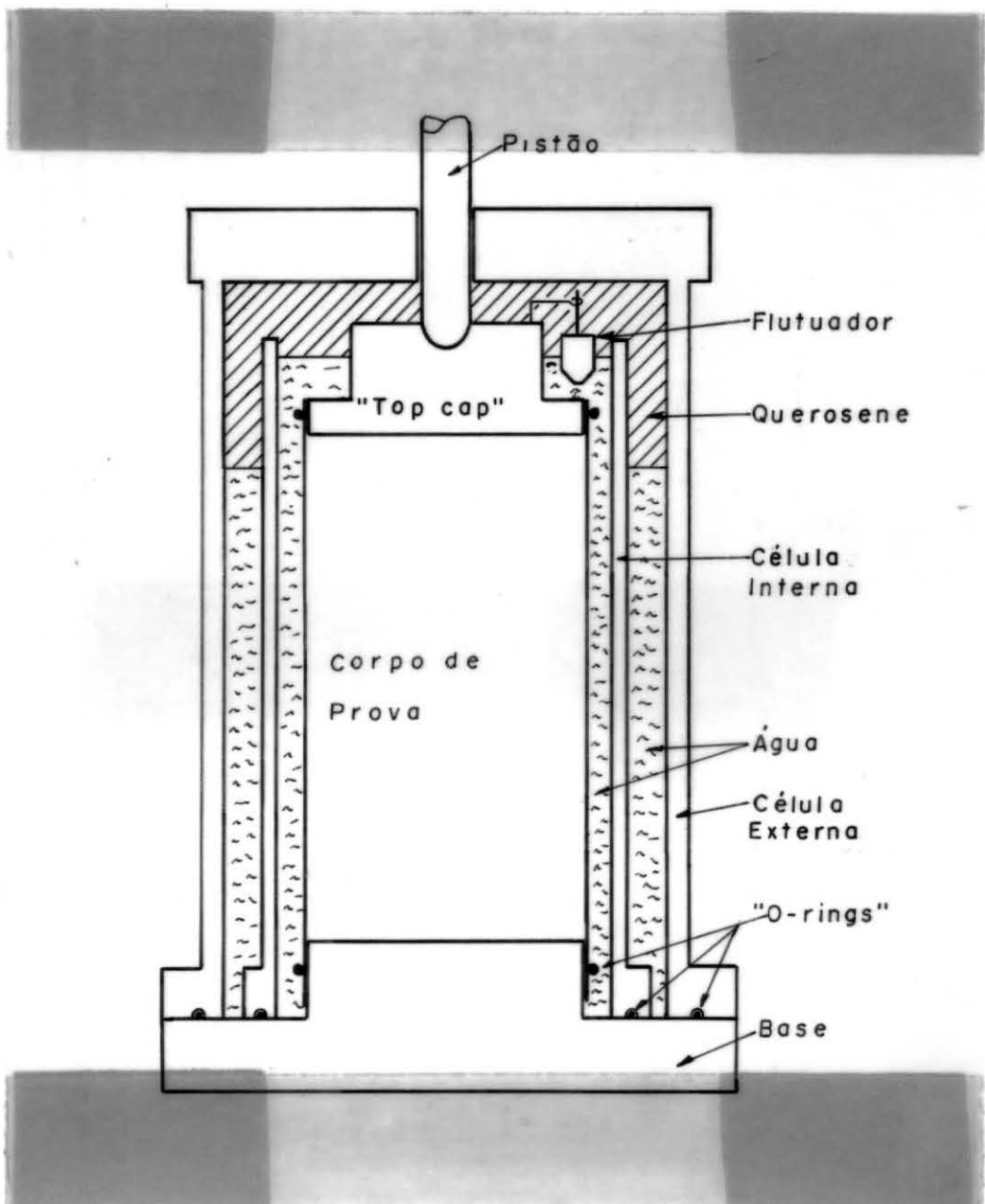


Figura 4.2 - Célula K_0 (Chapman, 1979).

A célula de Chapman (1979) consiste de uma célula interna e uma célula externa. Os espaços entre a célula interna e o corpo de prova e o espaço entre célula interna e a célula externa são preenchidos com água até a metade da altura do "*top cap*", sendo o restante preenchido com querosene.

Um flutuador de acrílico ôco de corpo cilíndrico com a face inferior em ponta cônica, selado na face superior e contendo uma quantidade apropriada de mercúrio forma um elemento mais denso que o querosene e menos denso que a água. Este flutuador é colocado na interface água-querosene no espaço entre o corpo de prova e a célula interna. A variação de volume do corpo de prova é calculado pelo deslocamento deste flutuador e as medidas de deslocamento do cilindro são realizadas através de um sistema de mira óptica (catetômetro).

No cálculo da variação do volume é necessário que se considere a penetração da membrana devido a mudança de pressão na célula e o deslocamento da água quando o "*top cap*" se movimenta.

Huang (1986) apresenta resultados obtidos com uma célula semelhante a apresentada por Campanella e Vaid (1972) em amostras adensadas em laboratório a partir de uma lama.

IV.3 - A CÉLULA K_0 DESENVOLVIDA NA COPPE.

A célula K_0 , aqui utilizada, foi desenvolvida na COPPE pelos Profs. IAN S. M. MARTINS e MAURÍCIO EHRLICH e aqui aperfeiçoada. Esta célula baseia-se na célula desenvolvida por Davis e Poulos (1963) descrita acima.

As principais características desta célula são:

- Possibilidade de adensamento nas condições K_0 ou isotrópico.
- Possibilidade que o corpo de prova seja adensado a uma velocidade de deformação controlada medindo-se

a poro pressão em sua face não drenada.

- O corpo de prova é envolvido somente por uma membrana de borracha, eliminando-se assim o atrito lateral que ocorre durante o adensamento edométrico.
- Possibilidade de saturação do corpo de prova por contra pressão.
- Possibilidade de levar o corpo de prova à ruptura drenada ou não drenada após a fase de adensamento.

IV.3.1 - PRINCÍPIO DA CÉLULA K_o .

O princípio da célula K_o aqui apresentada consiste em se fazer penetrar na célula um pistão de diâmetro idêntico ao diâmetro do corpo de prova garantindo que todo o sistema esteja saturado e que nenhum fluxo do fluido confinante ocorra durante o ensaio. Com isto toda deformação sofrida pelo corpo de prova é compensado pela penetração do pistão na célula, sendo nula a variação do volume do fluido confinante. Assim qualquer tendência de deformação lateral do corpo de prova será impedida por um acréscimo de pressão gerado no fluido confinante, considerado incompressível.

IV.3.2 - DESCRIÇÃO DA CÉLULA K_o .

A célula K_o aqui utilizada é apresentada esquematicamente pela figura 4.3 e descrita a seguir. As partes componentes desta célula estão detalhadas no Apêndice B.

Esta célula é composta de uma base (1) e uma câmara (2), ambas de aço inoxidável. A base e as paredes da câmara têm 30 mm de espessura, a fim de reduzir as expansões do sistema quando da aplicação da pressão.

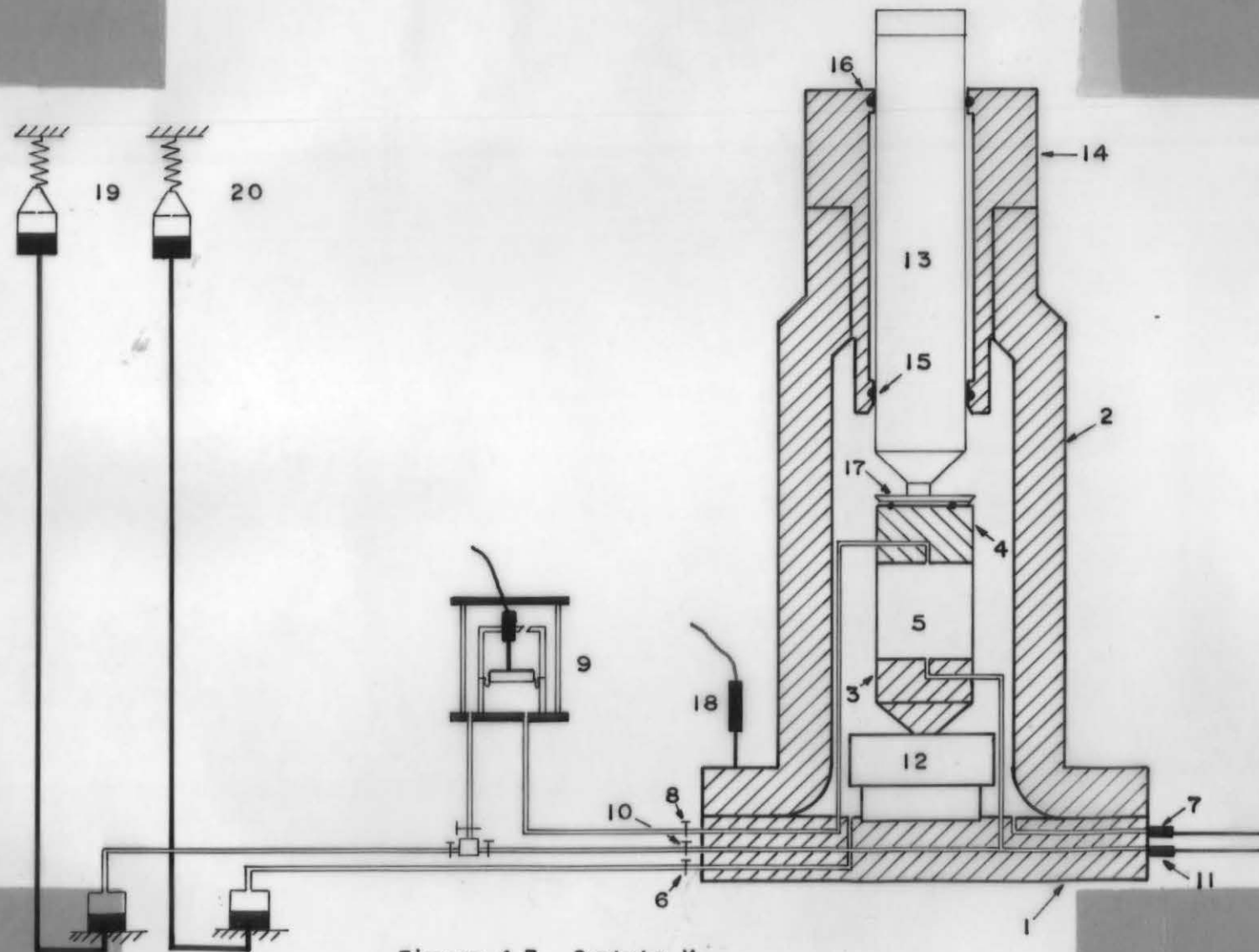


Figura 4.3 - Celula K₀

Estas dimensões citadas acima foram calculadas admitindo-se um erro de 4 % no valor da pressão confinante lida, quer seja pela compressão do fluido confinante quer seja pela expansão da célula.

Na base da célula existem cinco válvulas tipo "on-off", sendo duas conectadas à base do corpo de prova (3), duas em contato direto com a câmara da célula e uma em conexão com o "top cap" (4) do corpo de prova (5). A pressão hidrostática para a saturação do corpo de prova é aplicada por uma das torneiras que estão ligadas diretamente ao interior da célula (6), sendo a outra conectada um transdutor de pressão (7), que mede o desenvolvimento da pressão confinante durante o carregamento do corpo de prova.

A drenagem do corpo de prova é feita através da torneira (8) ligada ao "top cap" e a variação de volume é medida por um transdutor de volume (9) descrito em detalhe por Lira (1988). Uma das torneiras (10) ligada à base do corpo de prova, permite a aplicação da contra pressão para a saturação, e a outra a um transdutor de poro pressão (11) para o acompanhamento da poro pressão gerada durante o ensaio.

Alterações no projeto original da célula.

No projeto original, o sistema de medida da força axial era um transdutor de força externo. Este transdutor foi substituído por um transdutor de força interno (12) fixado à base da célula, visando-se eliminar o efeito do atrito entre o pistão (13) e a ante-câmara (14), visto que, quando o atrito do pistão era reduzido, surgia um vazamento na ante-câmara tornando os valores de σ_3 não confiáveis. Por outro lado, quando se tentava minimizar este vazamento o atrito do pistão com a ante-câmara atingia valores tão altos que não se podia estimar a carga axial transmitida ao corpo de prova.

A ante-câmara, acoplada à câmara por meio de uma rosca fina, era preenchida com óleo de silicone dearado.

Buscando-se anular o gradiente de pressão entre a água da célula e o óleo da ante-câmara, reduzindo-se assim o vazamento da água da célula, e portanto não ocorrendo perda da pressão confinante, a pressão no óleo, aplicada por um pote de mercúrio, era alterado durante todo o ensaio mantendo-se um gradiente máximo de 50 kPa.

Para se manter a ante-câmara sempre cheia de óleo utilizou-se um pote de interface água-óleo, não mostrado na figura, que recebia a pressão do pote de mercúrio (não mostrado na figura), e a transmitia à ante-câmara. Este procedimento permitia uma redução do atrito, evitando-se uma queda da pressão confinante. Contudo, o vazamento de óleo atrapalhava o manuseio da célula, por razões óbvias.

Com modificação do sistema de medida da força axial o efeito do atrito sobre o corpo de prova torna-se sem efeito, e a ante-câmara agora não mais preenchida de óleo, passou a ter como única finalidade, guiar o pistão de carregamento o mais vertical possível. O vazamento d'água da câmara é, no projeto atual, evitado pelo aperto dos "o-rings" da ante-câmara, (15) e (16).

Visto ser o corpo da célula todo em aço inoxidável, torna-se impossível garantir a centralização do pistão sobre o corpo de prova, desta forma no projeto original um centralizador preso à base do corpo de prova mantinha o "top cap" centralizado para um perfeito encaixe do pistão. Este sistema também foi alterado, optando-se por uma sapata circular (17) presa ao pistão e um sistema de rolamento sobre o "top cap". Para se garantir o ajuste do pistão sobre o "top cap" era observado uma mudança no sinal do transdutor de carga através de um amplificador de sinal ajustado na escala mais sensível de modo que uma variação total da escala correspondesse a uma carga de aproximadamente 1 N, o que é desprezível, para os níveis de tensões atuantes.

As medidas de deslocamento do corpo de prova foram obtidas através de um LVDT (18) acoplado a haste da máquina de ensaio.

A contra-pressão na água intersticial e a pressão

confinante σ_3 são aplicados através dos potes de mercúrio (19) e (20) respectivamente.

IV.4 - INSTRUMENTAÇÃO UTILIZADA NOS ENSAIOS K_0 .

Os transdutores utilizados neste ensaio estão descritos a seguir. As constantes dos transdutores são apresentada na tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Constantes dos transdutores

Transdutores	Constantes
u_b	0,0103224 mV/kPa/V _{inp}
σ_3	0,0102347 mV/kPa/V _{inp}
σ_1	9,93469 mV/N
LVDT	100,0 mV/mm
ΔV	0,1629 mV/cm ³ /V _{inp}
Pressão óleo	0,001025 mV/kPa/V _{inp}

Transdutor de pressão.

Os transdutores de pressão elétricos utilizados neste trabalho foram fabricados pela WYKEHAM FERRANCE com capacidade para 1000 kPa, alimentação de 10 Volts em corrente contínua e um fundo de escala da ordem de 10mV/Volt.

Transdutor de carga.

O transdutor de carga (figura 4B do Apêndice B) utilizado neste trabalho é do tipo interno, capacidade de 1000 kN, e alimentação de 5 Volts e fabricado nas oficinas mecânicas da COPPE .

Transdutor de deslocamento.

No presente trabalho utilizou-se um transdutor de deslocamento elétrico, LVDT, com curso linear de 30 mm, de fabricação do IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas-SP).

Transdutor de volume.

O medidor de volume utilizado neste trabalho é do tipo diafragma descrito em Lira (1988).

IV.5 - SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS.

O sistema utilizado para leitura e registro de sinais é basicamente o mesmo apresentado por Lira (1988) e descrito no capítulo III. Apenas os equipamentos não utilizados no capítulo III são descritos abaixo.

Condicionador de sinal.

Uma vez que o sinal do transdutor de carga era muito baixo utilizou-se de um condicionador/amplificador de sinais modelo DMP-305A, de fabricação da KYOWA.

Fontes de alimentação.

Os transdutores de pressão e de volume são conectados a um painel que por sua vez são ligada à bancada para sistemas automáticos de aquisição de dados. A fonte

utilizada para alimentação deste painel é de fabricação da ENTELBRA com alimentação estabilizada, saídas de ± 30 Volts e controle de amperagem para 2 e 4 fios, uma outra fonte similar a esta foi utilizada para a alimentação do transdutor de carga. O transdutor de deslocamento foi alimentado por uma fonte demoduladora de fabricação do IPT, esta fonte é parte integrante do modelo do transdutor utilizado.

IV.6 - MATERIAIS.

Para o teste desta nova célula, foram realizados um total de 9 ensaios triaxiais K_0 , sendo 1 em material argiloso compactado 6 com a amostra de caulim, e dois com a argila mole do Sarapuí além de um ensaio de adensamento edométrico incremental com amostra de caulim.

Argila compactada.

O material argiloso foi compactado com o compactador Harvard, aplicando uma pressão de 120 kPa em 15 golpes por camadas num total de 3 camadas, na umidade ótima (previamente determinada) menos 2% .

Argila mole do Sarapuí.

A amostra de argila mole ensaiada tem a mesma procedência que a utilizada no capítulo II tendo sido retirada a profundidade de 7,00 a 7,50 m.

Caulim.

Na preparação da amostra de caulim, 10 kg de caulim e 300 g de bentonita (3 %) foram misturadas. A medida que esta mistura era colocada na cuba do misturador, água era

adicionada. O consumo total de água foi de 13 kg. Após 3 horas de agitação da mistura, esta foi lançada num consolidômetro de 30 cm de diâmetro e uma pressão de ar comprimido de 100 kPa foi aplicada por 48 horas. Deste bloco foram moldados os corpos de prova utilizados no ensaio triaxial K_0 . Este material apresentou um limite de liquidez de 51 %, limite de plasticidade de 42 %, teor de umidade de 58,33 % e uma massa específica dos sólidos de 25,38 kN/m³.

IV.7 - ENSAIOS PRELIMINARES.

O material compactado foi inicialmente utilizado para se definir o procedimento de ensaio. Com os resultados obtidos do material compactado observou-se que o transdutor de carga usado era muito rígido, o que levou a sua substituição por um outro de sensibilidade 10 vezes maior.

Quando se optou em utilizar amostra da argila mole do Sarapuí tinha-se como um dos objetivos comparar os resultados obtidos na célula K_0 com os resultados do ensaio incremental e RFC. Após duas tentativas não bem sucedidas e devido a escassez de material, resolveu-se trabalhar com amostras de caulim e após resolvidos todos os problemas da célula K_0 estudar-se-iam as propriedades de compressibilidade da argila do Sarapuí, o que não foi possível devido à falta de tempo. Além dos resultados obtidos desses ensaios não apresentarem um comportamento esperado, como leituras de variação de volume próximas aos valores estimados pela deformação axial, também a forma final do corpo de prova (variação do diâmetro do corpo de prova ao longo de sua altura) demonstrou a má qualidade dos resultados.

Durante os primeiros ensaios, vários problemas de vazamento foram constatados além do efeito da variação de temperatura sobre os valores da pressão confinante.

IV.8 - RESULTADOS DO ENSAIO DEFINITIVO.

Somente um ensaio na célula K_0 será apresentado, uma vez que os demais não se mostraram satisfatórios. No ensaio apresentado, o corpo de prova após o ensaio apresentou uma seção transversal aproximadamente constante, o que pode ser observado pela diferença entre a variação de volume calculada e a lida pelo transdutor de variação de volume (figura 4.3). A variação de volume calculada foi obtida pelo produto dos valores de deformação axial e a seção transversal do corpo do prova. Durante a realização do ensaio apresentado, a temperatura foi verificada por um termômetro digital e mantida constante e igual a $21 \pm 0,2^\circ\text{C}$.

Uma outra verificação realizada antes do ensaio foi a da constância da pressão confinante com o tempo. Para isto foi aplicada uma contra-pressão para a saturação do corpo de prova igual a 400 kPa e que depois de se garantir a saturação do corpo de prova, as torneiras foram fechadas e leituras da pressão confinante foram tomadas durante 1 hora. No ensaio aqui apresentado não ocorreu queda de pressão. Os resultados deste ensaio estão apresentados nas figuras 4.4 a 4.7. A figura 4.4 apresenta as curvas das tensões : tempo. A figura 4.5 e 4.6 representam a variação de K_0 com a tensão e com a deformação respectivamente. A figura 4.7 apresenta uma comparação das curvas tensão : deformação obtidas pelo ensaio triaxial K_0 e o ensaio edométrico incremental.

O valores da tensão de pré-adensamento, calculados pelo método de Casagrande, são apresentados na tabela 4.2. Como pode-se ver pelos resultados apresentados, a pressão de pré-adensamento obtido pelo ensaio incremental é um pouco maior que o obtido pelo ensaio K_0 . Isto provavelmente se deve ao fato que o procedimento de montagem do corpo de prova produz muitas perturbações no mesmo. Um outro fato que se pode observar é que a amostra foi preparada sob uma tensão vertical aplicada de 100 kPa e apresenta uma tensão de pré-adensamento da ordem de 10 kPa. Essa discrepância deve-se a atritos internos no consolidômetro além de outros

problemas de concepção desse equipamento tais como vazamento de ar comprimido para a amostra com o consequente ressecamento da amostra das partes externas para o centro.

Tabela 4.2 - Tensão de pré-adensamento para o Caulim

Ensaio	σ'_{vm} (kPa)
$K_o - \sigma'_1$	8,0
Incremental	13,0

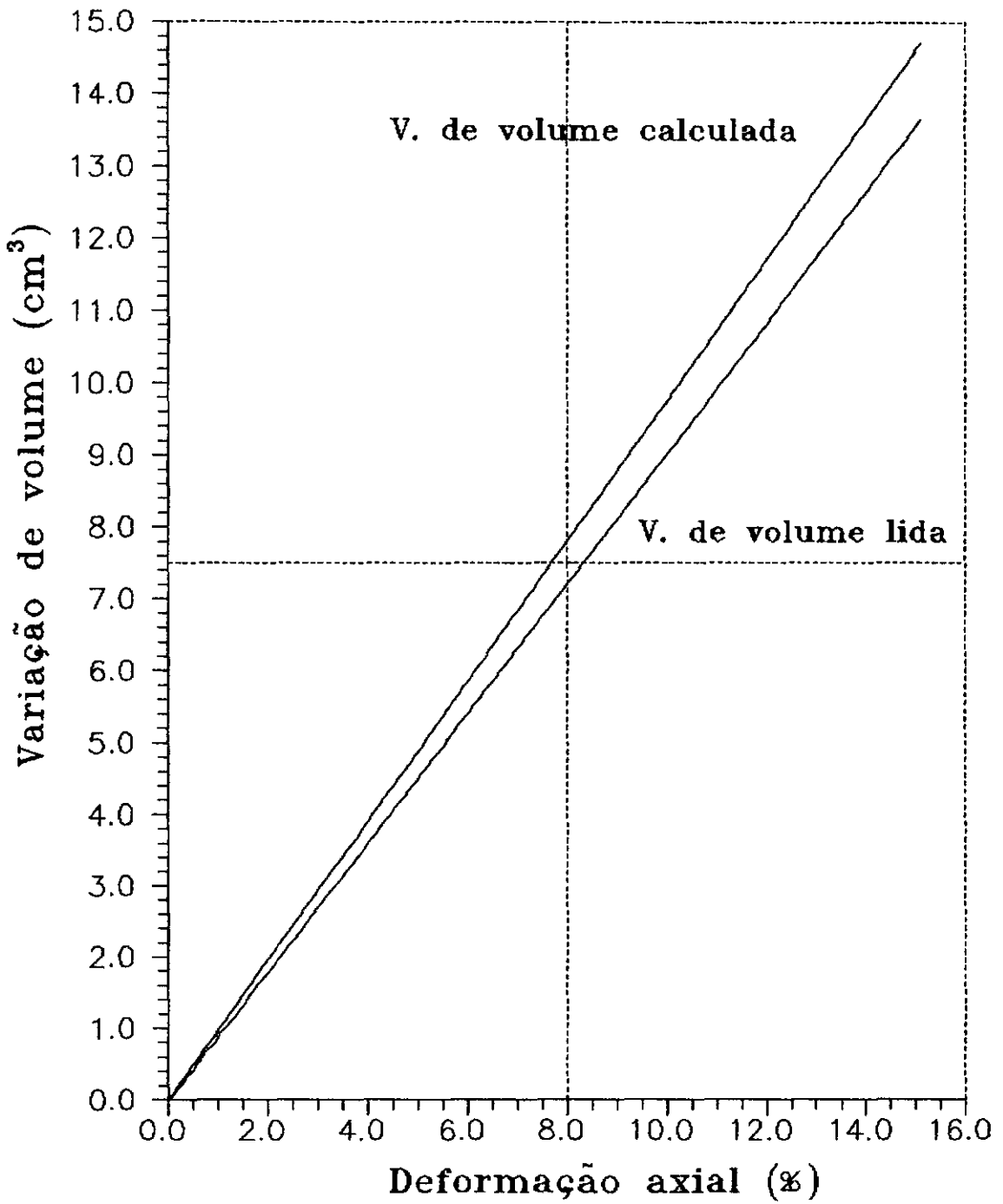


Figura 4.3 - Curva Deformação Axial versus Variação de Volume.

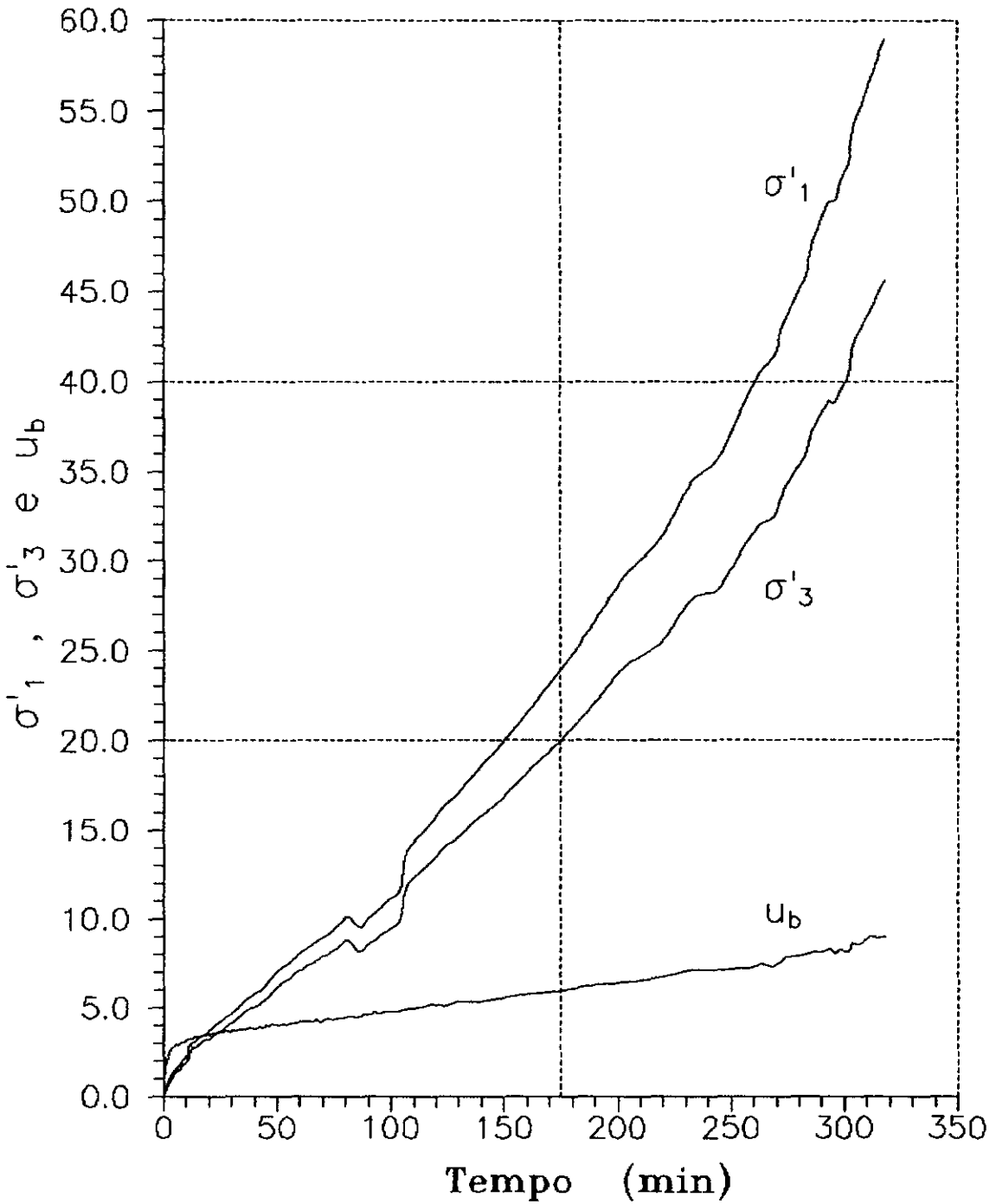


Figura 4.4 - Curva σ'_1 , σ'_3 e u_b : Tempo.

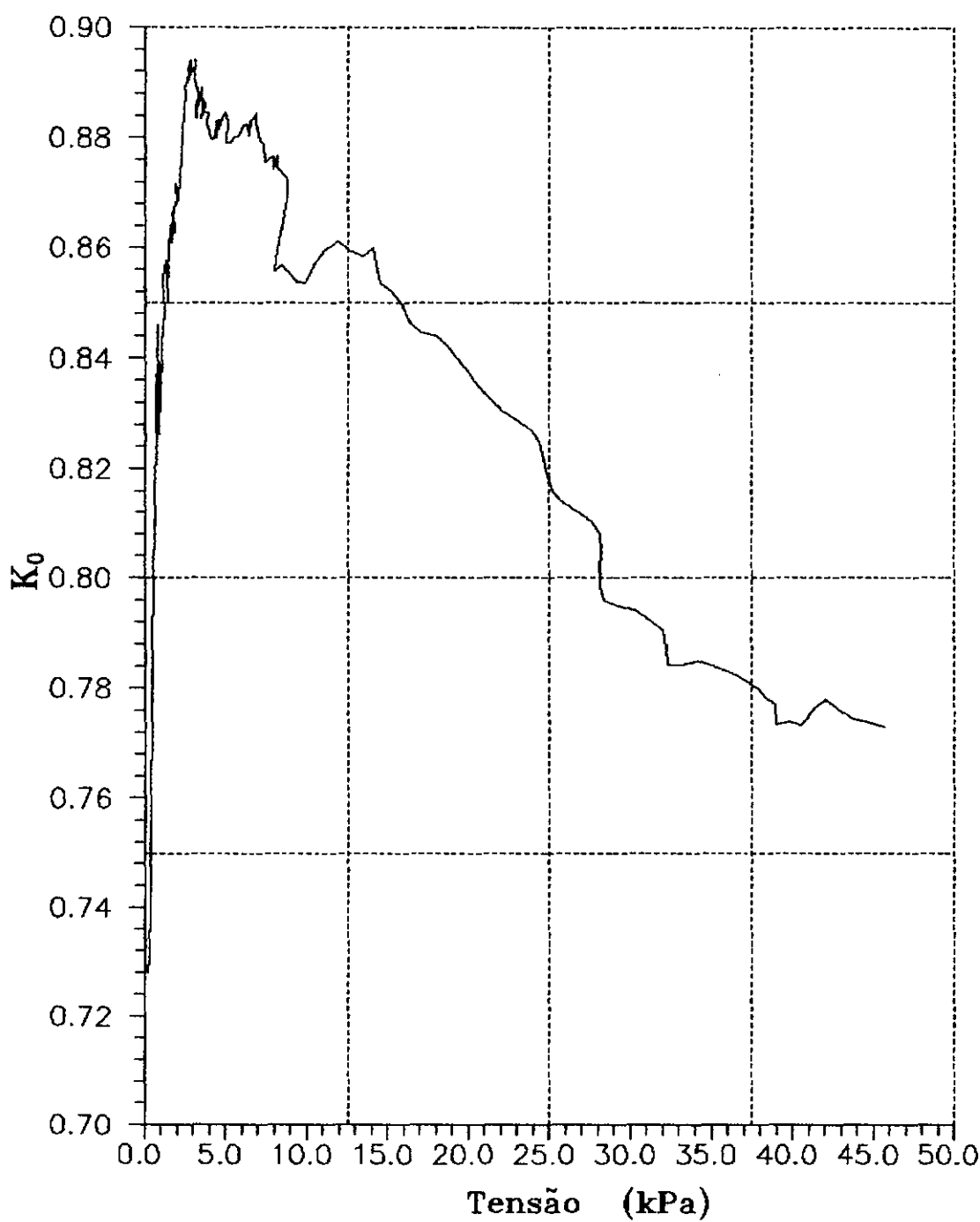
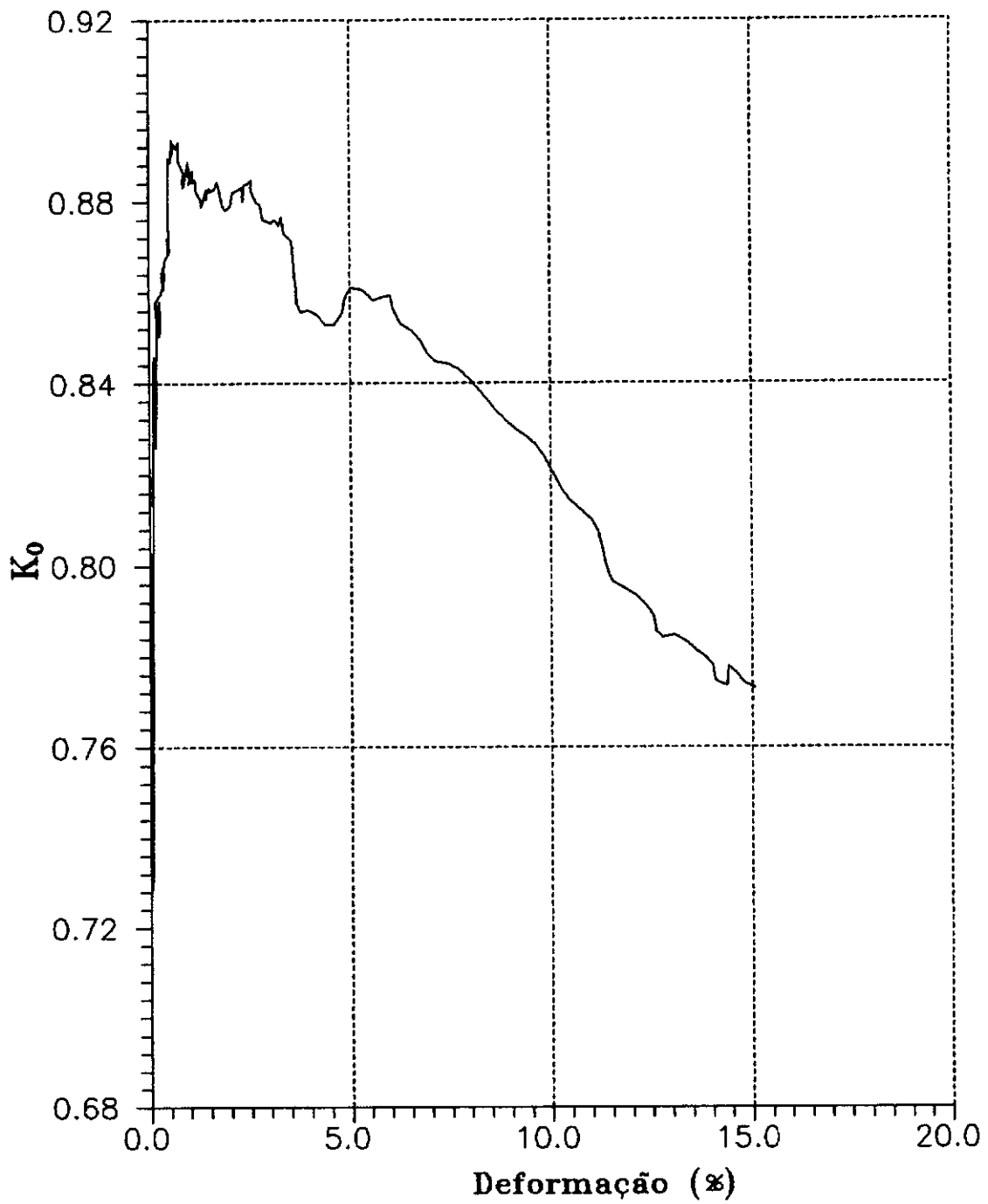


Figura 4.5 - Coeficiente de Empuxo no Repouso : σ'_3 .



————— Ensaio de adensamento K_0
 ○ ○ ○ ○ ○ Ensaio Incremental

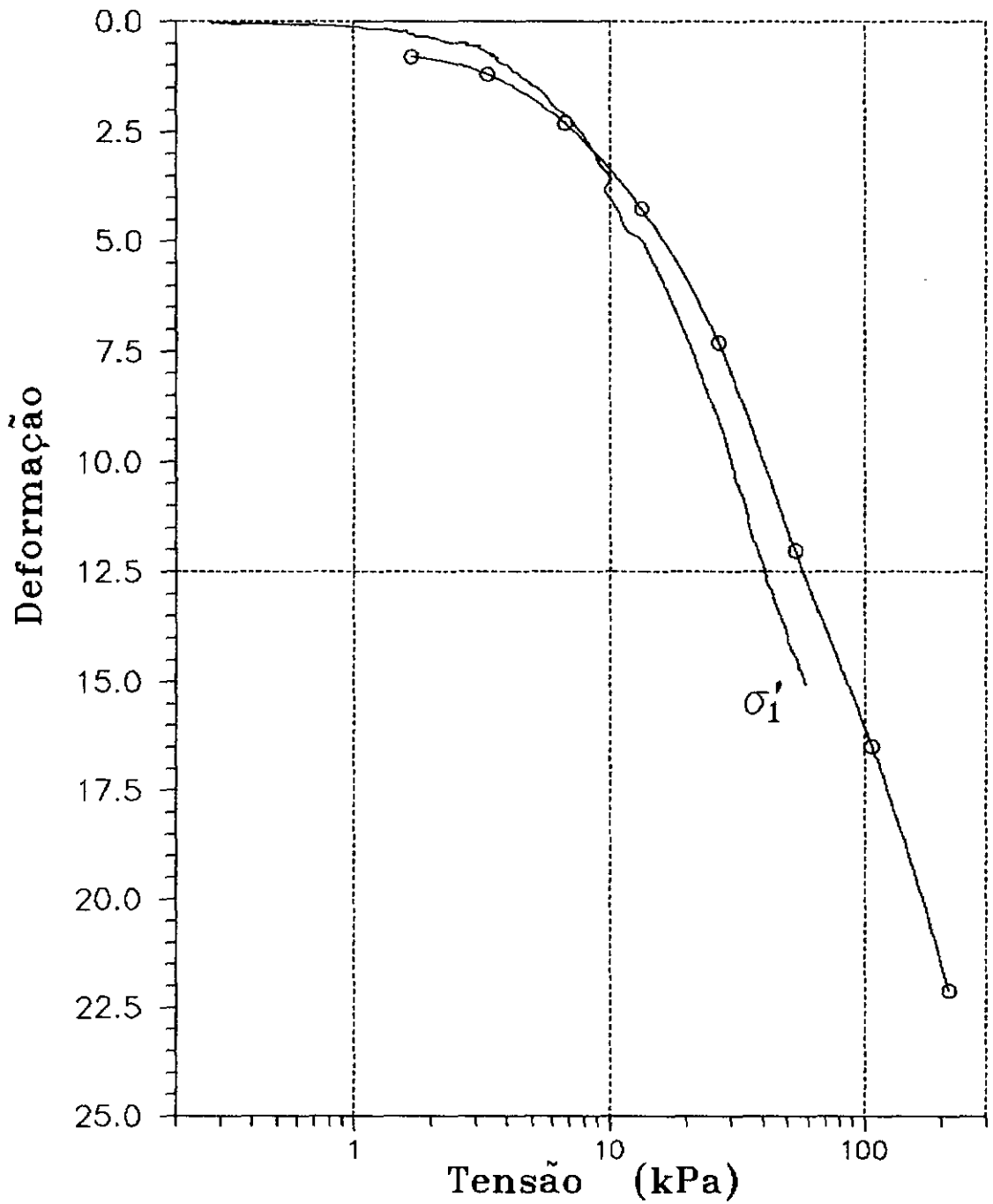


Figura 4.7 - Curva Tensão : Deformação.

IV.9 - COMENTÁRIOS SOBRE A CÉLULA K_0 .

Esta célula representa uma alternativa mais aprimorada para a determinação dos parâmetros de resistência e compressibilidade dos solos, tendo em vista as várias possibilidades de ensaio que ela oferece, conforme enumeradas no início deste capítulo. Contudo, algumas modificações devem ser feitas para se otimizar a utilização desta célula. Estas modificações devem facilitar a operação de saturação da célula, reduzir o peso próprio da célula, aumentar a altura do corpo de prova para uma relação altura/diâmetro da ordem de 2,5/1, e possibilitar a visualização do corpo de prova durante a montagem do pistão para a determinação do momento exato em que o pistão toca o corpo de prova.

o caso de compressão unidimensional, a não necessidade de se acompanhar todo o ensaio de adensamento. Por outro lado, o número de leituras

V - CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISA

V.1 - CONCLUSÕES.

V.1.1 - ENSAIOS INCREMENTAIS.

- De uma maneira geral, os valores de σ'_{vm} obtidos pelos métodos de Pacheco Silva, Casagrande e Pacheco Silva modificado apresentam-se razoavelmente concordantes.
- A utilização da curva $\log(1 + e) : \log \sigma'_v$ lineariza o trecho de compressão.
- O método de Pacheco Silva modificado não requer interpretação pessoal. Portanto, se o trecho de compressão virgem for linear no gráfico $\log(1 + e) : \log \sigma'_v$ recomenda-se a utilização deste método.
- Para tensões menores que a tensão de pré-adensamento, os métodos de Taylor e Su apresentam maiores valores de c_v do que os demais métodos aqui apresentados.
- Para tensões maiores do que a tensão de pré-adensamento todos os métodos apresentam valores similares para c_v .
- O método de Parkin apresenta os menores valores de c_v . Além de muito trabalhoso este método nem sempre pode ser utilizado, portanto não sendo recomendado para a determinação de c_v .
- O método de Scott tem como principal vantagem, para o caso de compressão unidimensional, a não necessidade de se acompanhar todo o ensaio de adensamento. Por outro lado, o número de leituras

para os demais métodos é tão reduzido, em geral 16 leituras, que somente isto não justifica a sua utilização.

- O método de Su não ofereceu nenhuma vantagem adicional.
- Recomenda-se a utilização, para o caso de compressão unidimensional, dos já consagrados métodos de Casagrande e Taylor tendo em vista tanto a simplicidade de utilização destes e a nenhuma contribuição relevante dos demais.

V.1.2 - ENSAIOS DE FLUXO RESTRINGIDO.

- As curvas $e : \log \sigma'_v$ obtidas pelo ensaio RFC apresentam-se razoavelmente concordantes com as obtidas no ensaio incremental.
- A utilização da curva $\log(1 + e) : \log \sigma'_v$ não lineariza o trecho de compressão virgem para os ensaios RFC4 e RFC5.
- Os valores de σ'_{vm} obtidos do ensaio RFC são superiores aos obtidos pelo ensaio incremental, sendo esta diferença mais acentuada principalmente a maiores profundidades.
- Os valores de σ'_{vm} obtidos pelos métodos de Pacheco Silva, Casagrande e Pacheco Silva modificado apresentam-se concordantes, enquanto que aqueles obtidos pelo método de Janbu são sensivelmente superiores aos demais.
- As curvas $m_v : \sigma'_v$ para o ensaio RFC mostraram razoavelmente concordantes com as do ensaio incremental, embora os valores para o ensaio RFC se apresentem maiores.

V.1.3 - ENSAIOS K_o

- Os resultados obtidos da célula triaxial K_o parece mostrar uma boa concordância com os resultados do ensaio incremental, contudo o pequeno número de ensaios não possibilite conclusões mais detalhadas.

V.2 - SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS.

- Medida do tempo durante o ensaio RFC e análise teórica desse ensaio visando o cálculo de c_v .
- Desenvolvimento de uma válvula para restringir o fluxo em substituição ao restritor de fluxo (já tentado em oxford sem sucesso), buscando eliminar as incertezas da definição de velocidade de drenagem.
- Desenvolver uma nova célula K_o com menor peso e de mais fácil montagem. A nova célula deve apresentar um sistema de saturação mais simples e mais eficaz, possibilitar a determinação do momento exato em que o pistão toca o corpo de prova, aumentar a altura do corpo de prova para uma relação altura/diâmetro da ordem de 2,5/1. Estes pontos são principalmente importantes quando se trata de solos sensíveis.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABOSHI, H.; YOSHIKUMI, H. e MURAYAMA, S. (1970), "Constant Loading Rate Consolidation Test", Soils and Foundations, Vol. 10, n. 01, pp. 43 - 56.
- ALMEIDA, M. S. S. (1988), "Ensaio Especial de Adensamento", Simpósio sobre Novos Conceitos em Ensaio de Campo e Laboratório em Geotecnia, Rio de Janeiro, Vol. 1, pp. 1 - 27, Maio.
- ALMEIDA, M. S. S.; COLLET, H. B.; ORTIGÃO, J. A. R. e TERRA, B. R. C. S. S. R. (1989), "Settlement Analysis of Embankment on Rio de Janeiro Clay with Vertical Drains" TWELVETH CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, Volume Especial de Contribuições Brasileiras, Rio de Janeiro, Agosto.
- ASAOKA, AKIRA (1978), "Observational Procedure of settlement prediction", Soil and Foundations, Vol. 18, n. 04, pp. 87 - 101.
- BISHOP, A. W. e HENKEL, D. J. (1962), The Measurement of Soil Properties in The Triaxial Test (second edition), Edward Arnold, London.
- BJERRUM, L. (1967), "Engineering Geology of Norwegian Normally Consolidated Marine Clays as Related Settlements of Buildings", Seventh Rankine Lecture, Géotechnique, Vol. 17, n. 02, pp. 81 - 118.
- BJERRUM, L. (1972), "The Effect of Rate of Loading on the P_c - Value Observed in Consolidation Testes on Soft Clays", Discussion, ASCE, Specialty Conference on Performance of Earth and Earth-Supported Structures, Proceedings, West Laffayette, Purdue, Vol. 2, pp. 167 - 168.

- BURMISTER, DONALD M. (1951), "The Application of Controlled Tests Methods in Consolidation Testing", SYMPOSIUM ON CONSOLIDATION TESTING OF SOILS, ASTM, Special Technical Publish, n. 126, pp. 83 - 109.
- CARVALHO, S. R. L. (1989), "Ensaio de Adensamento Edométrico com Taxa Constante de Deformação Específica Relacionada com o Tempo na Argila do Sarapu", Tese de M. Sc., COPPE-UFRJ, Agosto.
- CAMPANELLA, R. G. e VAID, Y. P. (1972), "A Simple K_0 Triaxial Cell", Canadian Geotechnical Journal, Vol. 09, n. 03, pp. 249 - 260.
- CHAPMAN, (1979), "The Interpretation of Friction Cone Penetrometer Tests in Sand", PhD Thesis, Department of Civil Engineering Monash University.
- CHRISTENSEN, R. W. e WU, T. H. (1964), "Analysis of Deformation as a Rate Process", Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, Vol. 90, n. SM6, pp. 125 - 157.
- COUTINHO, R. Q. (1976), "Características de Adensamento com Drenagem Radial de uma Argila Mole da Baixada Fluminense", Tese de M. Sc., COPPE-UFRJ, Novembro.
- CRAWFORD, CARL B. (1964), "Interpretation of the Consolidation Test", Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, Vol. 90, n. SM5, pp. 87 - 102.
- DAVIS, E. H. & POULOS, H. G. (1963), "Triaxial Testing and Three-dimensional Settlement Analysis", FOURTH AUSTRALIA - NEW ZEALAND CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING (On Soil Mechanics and Foundation), Proceedings, pp. 233 - 243.
- HAMILTON, J. J. e CRAWFORD, C. B. (1959), "Improved Determination of Preconsolidation of a Sensitive Clay",

- Special Technical Publish, ASTM, n. 254, pp. 254 - 271.
- HEAD, K. H. (1983), "*Continuous Consolidation Testing*", Ground Engineering, Vol. 16, n. 03, pp. 24 - 25.
- HEAD, K. H. (1986), Manual of Soil Laboratory Testing. London, Pentech Press, Vol. 3, 1^a Edição.
- HUANG, AN-BIN (1986), "*Laboratory Pressumeter Experiments In Clays Soils*", PhD Thesis, Purdue University.
- JAMIOLKOWSKI, M., LADD, C. C., GERMAINE, T. T. e LANCELLOTA, R., (1985), "*New Developments in Field and Laboratory Testing of Soils*", XI INT. CONF. ON SOIL MECH. AND FOUND. ENGINEERING, Proceedings, San Francisco, Vol. 2, pp. 1 - 97.
- JANBU, N. (1969), "*The Resistance Concept Apllied to Deformation of Soils*", SEVENTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, Proceedings, pp. 191 - 196.
- JANBU, N., TOKHEIM, O. e SENNESET, K. (1981), "*Consolidation Teste with Continuous Loading*", TENTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, Proceedings, Estocolmo, Vol. 01, pp. 645 - 654.
- LADD, CHARLES C. (1971), "*Settlement Analysis for Cohesive Soils*", Soil Publication, Vol. 272, Massachusetts Institute of Technology, 92 pp.
- LADD, CHARLES C., FOOT, R., ISHIHARA, K., SCHLOSSER, F. e POULOS, H. G. (1977), "*Stress-Deformation and Strength Characteristics*", NINETH CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, Proceedings, Vol. 02, pp. 421 - 494.

- LEE, K. (1977), "*Consolidation with Imperfectly Permeable Drainage Boundary*", University of Oxford Department of Engineering Science, Report n. OUEL 1349/81. (Paper submitted to the BGS for Cooling Prize Competition, 1981).
- LEE, K. (1979), "*An Analytical and Experimental Study on Large Strain Consolidation*", PhD. Thesis, Oxford University.
- LEE, K. (1981), "*Consolidation with Constant Rate of Deformation*", Géotechnique, Vol. 31, n. 02, pp. 215 - 229.
- LEONARDS, G. A. e RAMIAH, B. K. (1959), "*Times Effects in the Consolidation of Clays*", Special Technical Publish, ASTM, n. 254, pp. 116 - 130.
- LEONARDS, G. A. e GIRAULT, P. (1961), "*A Study of the One-dimensional Consolidation Tests*", FIFTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, Proceedings, Paris, Vol. 01, pp. 213 - 218.
- LEONARDS, G. A. e ALTSCHAEFFL, A. (1964), "*Compressibility of Clay*", SPECIALTY CONFERENCE ON DESIGN OF FOUNDATION FOR CONTROL OF SETTLEMENT, Proceedings, Evanston - Illinois, Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, Vol. 90, n. SM5, pp. 133 - 155.
- LEROUEIL, S., LEBIHAN, J. P. e TAVENAS, F. (1980), "*An approach for the Determination of the Preconsolidation Pressure in Sensitive Clays*", Canadian Geotechnical Journal, Vol. 17, n. 03, pp. 446 - 453.
- LEROUEIL, S., TAVENAS, F. e LEBIHAN, J. P. (1983), "*Propriétés Caractéristiques des Argiles de l'Est du Canada*", Canadian Geotechnical Journal, Vol. 20, n. 04, pp. 681 - 705.

- LIRA, E. N. SOUZA (1988), "Sistema Automático de Aquisição de Dados para Ensaio Triaxial", Tese de M.Sc., COPPE-UFRJ, Julho.
- LOWE III, J., JONES, E. e OBRICIAN, V. (1969), "Controlled Gradient Consolidation Test", Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, Vol. 95, n. SM1, pp. 77 - 97.
- LUN, P. T. W. e PARKIN, A. K. (1985), "Consolidation Behaviour Determinated by the Velocity Method", Canadian Geotechnical Journal, Vol. 22, pp. 158 - 165.
- MARTINS, I. S. MARQUES (1983), "Sobre uma Nova Relação Índice de vazios Tensão em Solos", Tese de M. Sc., COPPE-UFRJ, Julho..
- MERSI, G. e ROKHSAR, A. (1974), "Theory of Consolidation for Clays", Journal of Geotechnical Engineering Division, Vol. 100, n. GT8, pp. 889 - 904.
- MIKASA, M. (1963), "The Consolidaton of Soft Clay - A New Consolidation Theory and Its Application", Kajima Institution Publishing Co. Ltd, (citado por UMEHARA E ZEN, 1980).
- OLSON, R. E. (1986), "State of the Art: Consolidation Testing", Consolidation of Soils : Testing and Evaluation, Special Technical Publish, ASTM, n. 892, pp. 7 - 70.
- ORTIGÃO, J. A. E LACERDA, W. (1979), "Propriedades Geotécnicas da Argila Cinza do Rio de Janeiro", Relatório, Instituto de Pesquisas Rodoviárias D.N.E.R., Ministério dos Transportes, abril, 227 p.
- PACHECO SILVA, F. (1970), "Uma Nova Construção Gráfica para a Determinação da Pressão de Pré-adensamento de uma Amostra de Solo", IV CONGRESSO BRASILEIRO DE MACANICA

DOS SOLOS E ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES, Anais, Vol. II, tomo I, pp. 219 - 223.

PARKIN, A. K. (1978), "Coefficiente of Consolidation by the Velocity Method", Géotechnique, Vol. 28, n. 4, pp. 474 - 474.

PARKIN, A. K. (1981), "Consolidation Analysis by the Velocity Method", TENTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, Proceedings, Vol. 01, pp. 723 - 726.

PARKIN, A. K. (1981), e LUN, P. T. L., (1984), "Secondary Consolidation effects in the application of the velocity method", Canadian Geotechnical Journal, Vol. 21, pp. 126 - 128.

RAO, S. NARASINHA e KADANDARAMASWAMY, K. (1982), "Method to Predict Ultimate Compression in Clays", Technical Notes, Journal of Geotechnical Engineering Division, Vol. 108, n. GT2, pp. 310 - 314.

ROWE, P. W. e BARDEN, L. (1966), "A New Consolidation Cell", Géotechnique, Vol. 16, n. 02, pp. 162 - 170.

SAADA, A. S. (1970), "One Dimensional Consolidation in Triaxial Test Cell", Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, Vol. 96, n. SM3, pp. 1085 - 1089.

SCHIFFMAN, R. L. (1958), "Consolidation of Soil under Time Dependent Loading and Varying Permeability", Proc. Highway Res. Bd., Vol. 37, p. 584, (citado por ABOSHI e outros, 1970).

SCHMERTMANN, J. H. (1955), "The Undisturbed Consolidation of Clay", Transactions, ASCE, Vol 120 : pp. 1201 - 1227. Reprinted in Award-Winning ASCE Papers in Geotechnical Engineering", pp. 171 - 197, 1977.

- SCOTT, RONALD F. (1961), "New Method of Consolidation Coefficient Evaluation", Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, Vol. 87, n. SM1, pp. 29 - 39.
- SILLS, G. C., HOARE, S. D. L. e BAKER N. (1986) "An Experimental Assessment of The Restricted Flow Consolidation Test", Consolidation of Soils : Testing and Evaluation, Special Technical Publish, ASTM, n. 892, pp.
- SILLS, G. C. (1989), "Comunicação Pessoal"
- SIVARAM, B. e SWAMEE, P. K. (1977), "A Computational Method for Consolidation Coefficient", Soils and Foundations, Vol. 17, n. 01, pp. 48 - 52.
- SMITH, R. E. e WAHLS, H. E. (1969), "Consolidation Under Constant Rates of Strain", Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, Vol. 95, n. SM2, pp. 519 - 539.
- SU, HSUAN-LOH (1958), "Procedure for Rapid Consolidation Test", Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, Vol. 84, No. SM3, pp. 1 - 13, Proc. Paper 1729.
- TAVENAS, F. BRUCY, M., MAGNAN, J. P., LA ROCHELLE, P. e ROY, M. (1979), "Analyse Critique de la Théorie de Consolidation unidimensionnelle de Terzaghi", Revue Française de Géotechnique, Vol. 7, pp. 29 - 43.
- TAYLOR, D. W. (1948), Fundamentals of Soil Mechanics, John Wiley and Sons, New York.
- TERRA, B. R. C. S. S. R. (1988), "Análise de Recalques do Aterro Experimental II sobre a Argila Mole do Sarapu com Elementos Drenantes", Tese de M. Sc., COPPE-UFRJ.
- UMEHARA, YASUFUMI e ZEN KOUKI (1980), "Constant Rate of Strain Consolidation for Soft Clayey Soils", Soils and

Foundations, Vol. 20, n. 02, pp. 79 - 95.

VIEIRA, L. O. M. (1988), "*Contribuição ao Estudo do Adensamento Secundário*", Tese de M. Sc., COPPE.

WISSA, A. E. Z., CHRISTIAN, J. T., DAVIS, E. H. e HEIBERG, S. (1971), "*Consolidation at Constant Rate of Strain*", Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, Vol. 97, n. SM10, pp. 1393 - 1413.

WU, T. H., RESENDIZ, D. e NEWKIRCHNER, R. J. (1966), "*Analysis of Consolidation by Rate Process Theory*", Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, Vol. 92, n. SM6, pp. 229 - 248.

APENDICE A - TABELAS DE RAZÃO DE COMPRESSÃO VERSUS T_v

Tabela A 1 - Razão de compressão.

T_v	$N = \infty$	$N = 1.5$	$N = 2$	$N = 3$	$N = 4$
0.000	0.000673	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000
0.002	0.050463	0.816497	0.707107	0.577350	0.500000
0.004	0.071365	0.816497	0.707107	0.577350	0.500000
0.006	0.087404	0.816497	0.707107	0.577350	0.500000
0.008	0.100925	0.816497	0.707107	0.577350	0.500000
0.010	0.112838	0.816497	0.707107	0.577350	0.500000
0.012	0.123608	0.816497	0.707107	0.577350	0.500000
0.014	0.133512	0.816497	0.707107	0.577350	0.500000
0.016	0.142730	0.816497	0.707107	0.577350	0.500000
0.018	0.151388	0.816497	0.707107	0.577350	0.500000
0.020	0.159577	0.816497	0.707107	0.577350	0.500000
0.022	0.167366	0.816497	0.707107	0.577350	0.500000
0.024	0.174808	0.816497	0.707107	0.577350	0.500001
0.026	0.181946	0.816497	0.707107	0.577350	0.500003
0.028	0.188814	0.816497	0.707107	0.577351	0.500006
0.030	0.195441	0.816497	0.707107	0.577351	0.500012
0.032	0.201851	0.816497	0.707107	0.577352	0.500022
0.034	0.208063	0.816497	0.707107	0.577353	0.500037
0.036	0.214095	0.816497	0.707107	0.577355	0.500058
0.038	0.219962	0.816497	0.707107	0.577359	0.500088
0.040	0.225676	0.816497	0.707107	0.577365	0.500127
0.042	0.231249	0.816497	0.707107	0.577372	0.500178
0.044	0.236691	0.816497	0.707107	0.577383	0.500243
0.046	0.242010	0.816497	0.707108	0.577398	0.500323
0.048	0.247215	0.816497	0.707109	0.577417	0.500420
0.050	0.252313	0.816497	0.707110	0.577442	0.500534
0.052	0.257310	0.816497	0.707111	0.577473	0.500669
0.054	0.262212	0.816497	0.707113	0.577511	0.500824
0.056	0.267023	0.816497	0.707116	0.577556	0.501001
0.058	0.271750	0.816497	0.707120	0.577611	0.501201
0.060	0.276395	0.816498	0.707124	0.577675	0.501425
0.062	0.280964	0.816498	0.707130	0.577749	0.501674
0.064	0.285460	0.816499	0.707138	0.577835	0.501947
0.066	0.289886	0.816499	0.707147	0.577932	0.502246
0.068	0.294245	0.816501	0.707159	0.578042	0.502571

Tabela A f - Razão de compressão (cont.).

T_v	$N = \infty$	$N = 1.5$	$N = 2$	$N = 3$	$N = 4$
0.070	0.298541	0.816502	0.707173	0.578165	0.502922
0.072	0.302776	0.816504	0.707189	0.578302	0.503300
0.074	0.306952	0.816506	0.707208	0.578453	0.503704
0.076	0.311073	0.816509	0.707231	0.578618	0.504134
0.078	0.315139	0.816512	0.707257	0.578799	0.504591
0.080	0.319154	0.816517	0.707287	0.578996	0.505074
0.082	0.323119	0.816522	0.707320	0.579208	0.505584
0.084	0.327035	0.816528	0.707359	0.579437	0.506119
0.086	0.330906	0.816535	0.707402	0.579682	0.506680
0.088	0.334731	0.816543	0.707450	0.579943	0.507266
0.090	0.338513	0.816552	0.707503	0.580222	0.507877
0.092	0.342254	0.816563	0.707562	0.580517	0.508513
0.094	0.345954	0.816575	0.707627	0.580830	0.509173
0.096	0.349615	0.816589	0.707698	0.581159	0.509857
0.098	0.353237	0.816605	0.707776	0.581506	0.510564
0.100	0.356823	0.816623	0.707860	0.581870	0.511295
0.102	0.360374	0.816643	0.707950	0.582250	0.512048
0.104	0.363889	0.816665	0.708048	0.582648	0.512823
0.106	0.367371	0.816689	0.708153	0.583063	0.513620
0.108	0.370820	0.816716	0.708266	0.583495	0.514439
0.110	0.374237	0.816745	0.708386	0.583943	0.515278
0.112	0.377623	0.816778	0.708513	0.584408	0.516138
0.114	0.380979	0.816812	0.708649	0.584890	0.517017
0.116	0.384305	0.816850	0.708793	0.585388	0.517916
0.118	0.387603	0.816891	0.708945	0.585902	0.518834
0.120	0.390872	0.816935	0.709105	0.586432	0.519771
0.122	0.394115	0.816983	0.709273	0.586978	0.520726
0.124	0.397330	0.817034	0.709450	0.587539	0.521698
0.126	0.400519	0.817088	0.709635	0.588116	0.522688
0.128	0.403683	0.817146	0.709829	0.588707	0.523695
0.130	0.406822	0.817207	0.710031	0.589314	0.524718
0.132	0.409937	0.817272	0.710242	0.589936	0.525757
0.134	0.413028	0.817342	0.710462	0.590571	0.526812
0.136	0.416095	0.817415	0.710691	0.591221	0.527881
0.138	0.419140	0.817492	0.710928	0.591886	0.528966

Tabela A 1 - Razão de compressão (cont.).

T_v	$N = \infty$	$N = 1.5$	$N = 2$	$N = 3$	$N = 4$
0.140	0.422162	0.817573	0.711173	0.592563	0.530065
0.142	0.425162	0.817658	0.711428	0.593255	0.531178
0.144	0.428140	0.817747	0.711691	0.593959	0.532305
0.146	0.431097	0.817840	0.711962	0.594677	0.533445
0.148	0.434034	0.817938	0.712243	0.595407	0.534598
0.150	0.436950	0.818040	0.712531	0.596149	0.535764
0.152	0.439846	0.818146	0.712829	0.596904	0.536941
0.154	0.442722	0.818257	0.713134	0.597671	0.538131
0.156	0.445580	0.818372	0.713448	0.598450	0.539332
0.158	0.448418	0.818492	0.713771	0.599240	0.540544
0.160	0.451237	0.818615	0.714101	0.600042	0.541767
0.162	0.454038	0.818744	0.714440	0.600854	0.543000
0.164	0.456821	0.818876	0.714787	0.601678	0.544244
0.166	0.459585	0.819014	0.715142	0.602512	0.545498
0.168	0.462333	0.819155	0.715505	0.603356	0.546761
0.170	0.465063	0.819301	0.715876	0.604210	0.548033
0.172	0.467776	0.819452	0.716254	0.605074	0.549315
0.174	0.470472	0.819606	0.716640	0.605948	0.550605
0.176	0.473152	0.819766	0.717034	0.606831	0.551904
0.178	0.475815	0.819929	0.717435	0.607724	0.553210
0.180	0.478462	0.820097	0.717844	0.608625	0.554525
0.182	0.481093	0.820270	0.718259	0.609535	0.555847
0.184	0.483708	0.820447	0.718682	0.610454	0.557177
0.186	0.486308	0.820628	0.719112	0.611381	0.558513
0.188	0.488893	0.820813	0.719549	0.612316	0.559857
0.190	0.491462	0.821002	0.719993	0.613258	0.561207
0.192	0.494016	0.821196	0.720444	0.614209	0.562564
0.194	0.496556	0.821394	0.720901	0.615167	0.563926
0.196	0.499081	0.821596	0.721365	0.616132	0.565295
0.198	0.501592	0.821802	0.721835	0.617105	0.566669
0.200	0.504088	0.822013	0.722311	0.618084	0.568048
0.202	0.506570	0.822227	0.722794	0.619070	0.569433
0.204	0.509038	0.822445	0.723282	0.620063	0.570823
0.206	0.511492	0.822667	0.723777	0.621062	0.572218
0.208	0.513933	0.822894	0.724277	0.622067	0.573617

Tabela A 1 - Razão de compressão (cont.).

T_v	$N = \infty$	$N = 1.5$	$N = 2$	$N = 3$	$N = 4$
0.210	0.516360	0.823124	0.724784	0.623078	0.575020
0.212	0.518773	0.823357	0.725296	0.624095	0.576428
0.214	0.521173	0.823595	0.725813	0.625117	0.577840
0.216	0.523561	0.823836	0.726336	0.626145	0.579256
0.218	0.525935	0.824081	0.726864	0.627178	0.580675
0.220	0.528296	0.824330	0.727398	0.628217	0.582097
0.222	0.530644	0.824582	0.727936	0.629260	0.583523
0.224	0.532979	0.824837	0.728480	0.630308	0.584952
0.226	0.535302	0.825097	0.729028	0.631361	0.586384
0.228	0.537613	0.825359	0.729581	0.632419	0.587819
0.230	0.539911	0.825625	0.730139	0.633480	0.589256
0.232	0.542197	0.825894	0.730702	0.634546	0.590695
0.234	0.544470	0.826167	0.731269	0.635616	0.592137
0.236	0.546732	0.826442	0.731840	0.636690	0.593581
0.238	0.548982	0.826721	0.732416	0.637768	0.595027
0.240	0.551220	0.827003	0.732996	0.638849	0.596475
0.242	0.553446	0.827288	0.733580	0.639934	0.597924
0.244	0.555660	0.827576	0.734168	0.641023	0.599375
0.246	0.557863	0.827867	0.734760	0.642114	0.600827
0.248	0.560054	0.828161	0.735356	0.643209	0.602280
0.250	0.562234	0.828458	0.735956	0.644306	0.603734
0.252	0.564402	0.828758	0.736559	0.645407	0.605190
0.254	0.566559	0.829060	0.737166	0.646510	0.606646
0.256	0.568705	0.829365	0.737776	0.647616	0.608103
0.258	0.570840	0.829673	0.738389	0.648724	0.609560
0.260	0.572964	0.829983	0.739006	0.649835	0.611018
0.262	0.575077	0.830296	0.739627	0.650948	0.612476
0.264	0.577179	0.830612	0.740250	0.652063	0.613935
0.266	0.579270	0.830929	0.740876	0.653180	0.615393
0.268	0.581351	0.831250	0.741505	0.654299	0.616852
0.270	0.583421	0.831572	0.742138	0.655420	0.618310
0.272	0.585480	0.831897	0.742773	0.656543	0.619768
0.274	0.587529	0.832224	0.743410	0.657668	0.621226
0.276	0.589567	0.832554	0.744051	0.658794	0.622683
0.278	0.591595	0.832885	0.744694	0.659921	0.624139

Tabela A 1 - Razão de compressão (cont.).

T_v	$N = \infty$	$N = 1.5$	$N = 2$	$N = 3$	$N = 4$
0.280	0.593613	0.833219	0.745339	0.661050	0.625595
0.282	0.595620	0.833555	0.745987	0.662180	0.627051
0.284	0.597617	0.833893	0.746637	0.663311	0.628505
0.286	0.599604	0.834233	0.747290	0.664443	0.629958
0.288	0.601582	0.834575	0.747944	0.665576	0.631411
0.290	0.603549	0.834918	0.748601	0.666710	0.632862
0.292	0.605506	0.835264	0.749260	0.667845	0.634312
0.294	0.607453	0.835611	0.749921	0.668981	0.635761
0.296	0.609390	0.835961	0.750584	0.670117	0.637208
0.298	0.611318	0.836311	0.751249	0.671254	0.638654
0.300	0.613236	0.836664	0.751916	0.672391	0.640098
0.302	0.615144	0.837018	0.752584	0.673529	0.641541
0.304	0.617043	0.837374	0.753254	0.674667	0.642982
0.306	0.618932	0.837732	0.753926	0.675805	0.644421
0.308	0.620812	0.838091	0.754599	0.676943	0.645858
0.310	0.622682	0.838451	0.755274	0.678082	0.647294
0.312	0.624543	0.838813	0.755950	0.679220	0.648727
0.314	0.626395	0.839177	0.756628	0.680359	0.650158
0.316	0.628237	0.839542	0.757307	0.681497	0.651587
0.318	0.630071	0.839908	0.757988	0.682635	0.653014
0.320	0.631895	0.840275	0.758669	0.683773	0.654439
0.322	0.633709	0.840644	0.759352	0.684911	0.655861
0.324	0.635515	0.841014	0.760036	0.686048	0.657281
0.326	0.637312	0.841386	0.760721	0.687184	0.658699
0.328	0.639100	0.841758	0.761407	0.688321	0.660113
0.330	0.640879	0.842132	0.762094	0.689456	0.661526
0.332	0.642649	0.842506	0.762782	0.690591	0.662935
0.334	0.644410	0.842882	0.763471	0.691726	0.664342
0.336	0.646163	0.843259	0.764161	0.692859	0.665747
0.338	0.647907	0.843637	0.764851	0.693992	0.667148
0.340	0.649642	0.844016	0.765543	0.695124	0.668547
0.342	0.651368	0.844395	0.766235	0.696255	0.669942
0.344	0.653086	0.844776	0.766927	0.697385	0.671335
0.346	0.654796	0.845158	0.767620	0.698514	0.672725
0.348	0.656497	0.845540	0.768314	0.699642	0.674112

Tabela A 1 - Razão de compressão (cont.).

T_v	$N = \infty$	$N = 1.5$	$N = 2$	$N = 3$	$N = 4$
0.350	0.658189	0.845924	0.769009	0.700769	0.675495
0.352	0.659873	0.846308	0.769704	0.701895	0.676876
0.354	0.661549	0.846693	0.770399	0.703020	0.678253
0.356	0.663216	0.847078	0.771095	0.704143	0.679627
0.358	0.664875	0.847465	0.771791	0.705265	0.680998
0.360	0.666526	0.847852	0.772487	0.706385	0.682366
0.362	0.668169	0.848240	0.773184	0.707505	0.683730
0.364	0.669804	0.848628	0.773881	0.708622	0.685091
0.366	0.671430	0.849017	0.774578	0.709739	0.686448
0.368	0.673049	0.849407	0.775275	0.710854	0.687802
0.370	0.674659	0.849797	0.775973	0.711967	0.689153
0.372	0.676262	0.850188	0.776671	0.713078	0.690499
0.374	0.677856	0.850579	0.777368	0.714188	0.691843
0.376	0.679443	0.850971	0.778066	0.715297	0.693183
0.378	0.681022	0.851363	0.778764	0.716403	0.694519
0.380	0.682593	0.851756	0.779462	0.717508	0.695852
0.382	0.684156	0.852149	0.780159	0.718611	0.697180
0.384	0.685711	0.852543	0.780857	0.719712	0.698506
0.386	0.687259	0.852937	0.781555	0.720812	0.699827
0.388	0.688799	0.853331	0.782252	0.721909	0.701145
0.390	0.690332	0.853726	0.782949	0.723005	0.702459
0.392	0.691857	0.854121	0.783646	0.724098	0.703769
0.394	0.693374	0.854516	0.784343	0.725190	0.705075
0.396	0.694884	0.854912	0.785040	0.726279	0.706378
0.398	0.696387	0.855308	0.785736	0.727367	0.707676
0.400	0.697882	0.855704	0.786432	0.728452	0.708971
0.420	0.712433	0.859674	0.793368	0.739185	0.721699
0.440	0.726282	0.863650	0.800246	0.749680	0.734018
0.460	0.739463	0.867616	0.807046	0.759917	0.745916
0.480	0.752009	0.871559	0.813749	0.769879	0.757388
0.500	0.763950	0.875469	0.820341	0.779556	0.768430
0.520	0.775317	0.879336	0.826810	0.788936	0.779045
0.540	0.786135	0.883152	0.833147	0.798016	0.789236
0.560	0.796433	0.886912	0.839344	0.806792	0.799010
0.580	0.806235	0.890608	0.845393	0.815262	0.808375

Tabela A 1 - Razão de compressão (cont.).

T_v	N = 5	N = 10	N = 20	N = 40	N = 100
0.000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000
0.002	0.447214	0.316228	0.223607	0.158114	0.100107
0.004	0.447214	0.316228	0.223607	0.158154	0.102259
0.006	0.447214	0.316228	0.223612	0.158565	0.107170
0.008	0.447214	0.316228	0.223664	0.159719	0.113731
0.010	0.447214	0.316229	0.223846	0.161686	0.121167
0.012	0.447214	0.316236	0.224244	0.164370	0.129022
0.014	0.447214	0.316257	0.224914	0.167637	0.137022
0.016	0.447214	0.316308	0.225876	0.171365	0.144998
0.018	0.447214	0.316406	0.227130	0.175455	0.152847
0.020	0.447215	0.316566	0.228659	0.179825	0.160513
0.022	0.447218	0.316803	0.230442	0.184410	0.167963
0.024	0.447225	0.317129	0.232454	0.189159	0.175188
0.026	0.447236	0.317552	0.234673	0.194030	0.182187
0.028	0.447255	0.318076	0.237074	0.198987	0.188967
0.030	0.447285	0.318704	0.239639	0.204002	0.195538
0.032	0.447327	0.319437	0.242347	0.209052	0.201912
0.034	0.447387	0.320273	0.245183	0.214118	0.208101
0.036	0.447465	0.321210	0.248131	0.219183	0.214119
0.038	0.447566	0.322244	0.251177	0.224234	0.219977
0.040	0.447692	0.323373	0.254310	0.229262	0.225685
0.042	0.447845	0.324590	0.257520	0.234257	0.231255
0.044	0.448027	0.325894	0.260795	0.239212	0.236695
0.046	0.448241	0.327279	0.264129	0.244122	0.242013
0.048	0.448488	0.328740	0.267512	0.248984	0.247217
0.050	0.448769	0.330274	0.270938	0.253793	0.252314
0.052	0.449086	0.331877	0.274400	0.258547	0.257311
0.054	0.449438	0.333545	0.277892	0.263246	0.262212
0.056	0.449827	0.335274	0.281410	0.267887	0.267023
0.058	0.450253	0.337060	0.284948	0.272471	0.271750
0.060	0.450716	0.338900	0.288503	0.276997	0.276395
0.062	0.451216	0.340792	0.292069	0.281466	0.280964
0.064	0.451752	0.342731	0.295644	0.285878	0.285460
0.066	0.452325	0.344715	0.299225	0.290235	0.289886
0.068	0.452935	0.346741	0.302808	0.294536	0.294245

Tabela A 1 - Razão de compressão (cont.).

T_v	N = 5	N = 10	N = 20	N = 40	N = 100
0.070	0.453579	0.348807	0.306391	0.298783	0.298541
0.072	0.454259	0.350910	0.309971	0.302977	0.302776
0.074	0.454974	0.353047	0.313546	0.307120	0.306952
0.076	0.455722	0.355218	0.317115	0.311212	0.311073
0.078	0.456504	0.357419	0.320675	0.315255	0.315139
0.080	0.457318	0.359649	0.324225	0.319250	0.319154
0.082	0.458163	0.361906	0.327763	0.323199	0.323119
0.084	0.459040	0.364188	0.331289	0.327102	0.327035
0.086	0.459947	0.366493	0.334800	0.330961	0.330906
0.088	0.460883	0.368820	0.338296	0.334777	0.334731
0.090	0.461848	0.371168	0.341777	0.338551	0.338513
0.092	0.462841	0.373534	0.345241	0.342285	0.342254
0.094	0.463861	0.375918	0.348687	0.345980	0.345954
0.096	0.464908	0.378318	0.352115	0.349636	0.349615
0.098	0.465980	0.380733	0.355525	0.353255	0.353237
0.100	0.467077	0.383162	0.358916	0.356838	0.356823
0.102	0.468198	0.385604	0.362287	0.360386	0.360374
0.104	0.469343	0.388057	0.365639	0.363899	0.363889
0.106	0.470510	0.390521	0.368971	0.367379	0.367371
0.108	0.471700	0.392995	0.372282	0.370827	0.370820
0.110	0.472911	0.395478	0.375574	0.374243	0.374237
0.112	0.474143	0.397969	0.378845	0.377628	0.377623
0.114	0.475395	0.400466	0.382095	0.380983	0.380979
0.116	0.476666	0.402970	0.385325	0.384308	0.384305
0.118	0.477957	0.405480	0.388534	0.387606	0.387603
0.120	0.479266	0.407994	0.391723	0.390875	0.390872
0.122	0.480592	0.410513	0.394892	0.394116	0.394115
0.124	0.481936	0.413034	0.398040	0.397332	0.397330
0.126	0.483296	0.415559	0.401168	0.400521	0.400519
0.128	0.484673	0.418086	0.404275	0.403684	0.403683
0.130	0.486065	0.420614	0.407363	0.406823	0.406822
0.132	0.487472	0.423144	0.410430	0.409938	0.409937
0.134	0.488894	0.425674	0.413478	0.413028	0.413028
0.136	0.490329	0.428204	0.416506	0.416096	0.416095
0.138	0.491779	0.430733	0.419514	0.419140	0.419140

Tabela A 1 - Razão de compressão (cont.).

T_v	N = 5	N = 10	N = 20	N = 40	N = 100
0.140	0.493241	0.433262	0.422504	0.422162	0.422162
0.142	0.494716	0.435789	0.425474	0.425162	0.425162
0.144	0.496203	0.438314	0.428425	0.428140	0.428140
0.146	0.497702	0.440837	0.431357	0.431098	0.431097
0.148	0.499213	0.443358	0.434271	0.434034	0.434034
0.150	0.500734	0.445876	0.437166	0.436950	0.436950
0.152	0.502266	0.448390	0.440043	0.439846	0.439846
0.154	0.503808	0.450900	0.442902	0.442723	0.442722
0.156	0.505360	0.453407	0.445743	0.445580	0.445580
0.158	0.506921	0.455909	0.448567	0.448418	0.448418
0.160	0.508492	0.458407	0.451373	0.451237	0.451237
0.162	0.510070	0.460900	0.454162	0.454038	0.454038
0.164	0.511658	0.463387	0.456934	0.456821	0.456821
0.166	0.513253	0.465869	0.459689	0.459585	0.459585
0.168	0.514856	0.468346	0.462427	0.462333	0.462333
0.170	0.516466	0.470817	0.465149	0.465063	0.465063
0.172	0.518083	0.473281	0.467854	0.467776	0.467776
0.174	0.519707	0.475740	0.470543	0.470472	0.470472
0.176	0.521337	0.478191	0.473216	0.473152	0.473152
0.178	0.522974	0.480636	0.475874	0.475815	0.475815
0.180	0.524616	0.483075	0.478516	0.478462	0.478462
0.182	0.526264	0.485506	0.481142	0.481093	0.481093
0.184	0.527916	0.487930	0.483753	0.483708	0.483708
0.186	0.529574	0.490346	0.486349	0.486308	0.486308
0.188	0.531237	0.492755	0.488930	0.488893	0.488893
0.190	0.532904	0.495156	0.491496	0.491462	0.491462
0.192	0.534575	0.497550	0.494047	0.494016	0.494016
0.194	0.536250	0.499935	0.496584	0.496556	0.496556
0.196	0.537929	0.502313	0.499107	0.499081	0.499081
0.198	0.539611	0.504682	0.501615	0.501592	0.501592
0.200	0.541297	0.507044	0.504109	0.504088	0.504088
0.202	0.542985	0.509396	0.506589	0.506570	0.506570
0.204	0.544676	0.511741	0.509056	0.509038	0.509038
0.206	0.546370	0.514077	0.511508	0.511492	0.511492
0.208	0.548066	0.516404	0.513947	0.513933	0.513933

Tabela A 1 - Razão de compressão (cont.).

T_v	N = 5	N = 10	N = 20	N = 40	N = 100
0.210	0.549765	0.518722	0.516373	0.516360	0.516360
0.212	0.551465	0.521032	0.518785	0.518773	0.518773
0.214	0.553167	0.523333	0.521184	0.521173	0.521173
0.216	0.554870	0.525625	0.523570	0.523561	0.523561
0.218	0.556575	0.527908	0.525944	0.525935	0.525935
0.220	0.558281	0.530182	0.528304	0.528296	0.528296
0.222	0.559988	0.532448	0.530651	0.530644	0.530644
0.224	0.561695	0.534704	0.532986	0.532979	0.532979
0.226	0.563404	0.536950	0.535309	0.535302	0.535302
0.228	0.565112	0.539188	0.537618	0.537613	0.537613
0.230	0.566821	0.541416	0.539916	0.539911	0.539911
0.232	0.568531	0.543636	0.542201	0.542197	0.542197
0.234	0.570240	0.545846	0.544475	0.544470	0.544470
0.236	0.571949	0.548046	0.546736	0.546732	0.546732
0.238	0.573657	0.550238	0.548985	0.548982	0.548982
0.240	0.575365	0.552420	0.551223	0.551220	0.551220
0.242	0.577073	0.554592	0.553448	0.553446	0.553446
0.244	0.578779	0.556756	0.555663	0.555660	0.555660
0.246	0.580485	0.558910	0.557865	0.557863	0.557863
0.248	0.582190	0.561054	0.560056	0.560054	0.560054
0.250	0.583893	0.563190	0.562236	0.562234	0.562234
0.252	0.585595	0.565315	0.564404	0.564402	0.564402
0.254	0.587296	0.567432	0.566561	0.566559	0.566559
0.256	0.588995	0.569539	0.568707	0.568705	0.568705
0.258	0.590693	0.571637	0.570841	0.570840	0.570840
0.260	0.592388	0.573725	0.572965	0.572964	0.572964
0.262	0.594082	0.575804	0.575078	0.575077	0.575077
0.264	0.595774	0.577873	0.577180	0.577179	0.577179
0.266	0.597463	0.579934	0.579271	0.579270	0.579270
0.268	0.599150	0.581984	0.581352	0.581351	0.581351
0.270	0.600835	0.584026	0.583421	0.583421	0.583421
0.272	0.602518	0.586058	0.585481	0.585480	0.585480
0.274	0.604198	0.588081	0.587529	0.587529	0.587529
0.276	0.605875	0.590094	0.589568	0.589567	0.589567
0.278	0.607549	0.592099	0.591596	0.591595	0.591595

Tabela A 1 - Razão de compressão (cont.).

T_v	N = 5	N = 10	N = 20	N = 40	N = 100
0.280	0.609221	0.594094	0.593613	0.593613	0.593613
0.282	0.610890	0.596080	0.595621	0.595620	0.595620
0.284	0.612555	0.598056	0.597618	0.597617	0.597617
0.286	0.614218	0.600023	0.599605	0.599604	0.599604
0.288	0.615877	0.601982	0.601582	0.601582	0.601582
0.290	0.617534	0.603931	0.603549	0.603549	0.603549
0.292	0.619186	0.605871	0.605506	0.605506	0.605506
0.294	0.620836	0.607801	0.607453	0.607453	0.607453
0.296	0.622482	0.609723	0.609391	0.609390	0.609390
0.298	0.624124	0.611636	0.611318	0.611318	0.611318
0.300	0.625763	0.613539	0.613236	0.613236	0.613236
0.302	0.627398	0.615434	0.615145	0.615144	0.615144
0.304	0.629029	0.617320	0.617043	0.617043	0.617043
0.306	0.630656	0.619196	0.618933	0.618932	0.618932
0.308	0.632280	0.621064	0.620812	0.620812	0.620812
0.310	0.633899	0.622923	0.622683	0.622682	0.622682
0.312	0.635515	0.624773	0.624544	0.624543	0.624543
0.314	0.637126	0.626614	0.626395	0.626395	0.626395
0.316	0.638733	0.628447	0.628237	0.628237	0.628237
0.318	0.640336	0.630270	0.630071	0.630071	0.630071
0.320	0.641935	0.632085	0.631895	0.631895	0.631895
0.322	0.643530	0.633892	0.633710	0.633709	0.633709
0.324	0.645120	0.635689	0.635515	0.635515	0.635515
0.326	0.646706	0.637478	0.637312	0.637312	0.637312
0.328	0.648287	0.639258	0.639100	0.639100	0.639100
0.330	0.649864	0.641030	0.640879	0.640879	0.640879
0.332	0.651436	0.642793	0.642649	0.642649	0.642649
0.334	0.653004	0.644548	0.644410	0.644410	0.644410
0.336	0.654567	0.646294	0.646163	0.646163	0.646163
0.338	0.656126	0.648032	0.647907	0.647907	0.647907
0.340	0.657679	0.649762	0.649642	0.649642	0.649642
0.342	0.659228	0.651483	0.651368	0.651368	0.651368
0.344	0.660773	0.653195	0.653086	0.653086	0.653086
0.346	0.662312	0.654900	0.654796	0.654796	0.654796
0.348	0.663847	0.656596	0.656497	0.656497	0.656497

Tabela A 1 - Razão de compressão (cont.).

T_v	N = 5	N = 10	N = 20	N = 40	N = 100
0.350	0.665377	0.658284	0.658189	0.658189	0.658189
0.352	0.666902	0.659964	0.659873	0.659873	0.659873
0.354	0.668422	0.661635	0.661549	0.661549	0.661549
0.356	0.669937	0.663299	0.663216	0.663216	0.663216
0.358	0.671447	0.664954	0.664875	0.664875	0.664875
0.360	0.672952	0.666601	0.666526	0.666526	0.666526
0.362	0.674452	0.668241	0.668169	0.668169	0.668169
0.364	0.675947	0.669872	0.669804	0.669804	0.669804
0.366	0.677437	0.671495	0.671430	0.671430	0.671430
0.368	0.678922	0.673111	0.673049	0.673049	0.673049
0.370	0.680402	0.674718	0.674659	0.674659	0.674659
0.372	0.681877	0.676318	0.676262	0.676262	0.676262
0.374	0.683346	0.677910	0.677856	0.677856	0.677856
0.376	0.684811	0.679494	0.679443	0.679443	0.679443
0.378	0.686270	0.681071	0.681022	0.681022	0.681022
0.380	0.687724	0.682640	0.682593	0.682593	0.682593
0.382	0.689172	0.684201	0.684156	0.684156	0.684156
0.384	0.690616	0.685754	0.685711	0.685711	0.685711
0.386	0.692054	0.687300	0.687259	0.687259	0.687259
0.388	0.693487	0.688838	0.688799	0.688799	0.688799
0.390	0.694915	0.690369	0.690332	0.690332	0.690332
0.392	0.696337	0.691892	0.691857	0.691857	0.691857
0.394	0.697754	0.693408	0.693374	0.693374	0.693374
0.396	0.699166	0.694916	0.694884	0.694884	0.694884
0.398	0.700573	0.696417	0.696387	0.696387	0.696387
0.400	0.701974	0.697911	0.697882	0.697882	0.697882
0.420	0.715693	0.712451	0.712433	0.712433	0.712433
0.440	0.728876	0.726293	0.726282	0.726282	0.726282
0.460	0.741525	0.739470	0.739463	0.739463	0.739463
0.480	0.753646	0.752013	0.752009	0.752009	0.752009
0.500	0.765249	0.763953	0.763950	0.763950	0.763950
0.520	0.776346	0.775318	0.775317	0.775317	0.775317
0.540	0.786951	0.786136	0.786135	0.786135	0.786135
0.560	0.797079	0.796434	0.796433	0.796433	0.796433
0.580	0.806746	0.806235	0.806235	0.806235	0.806235

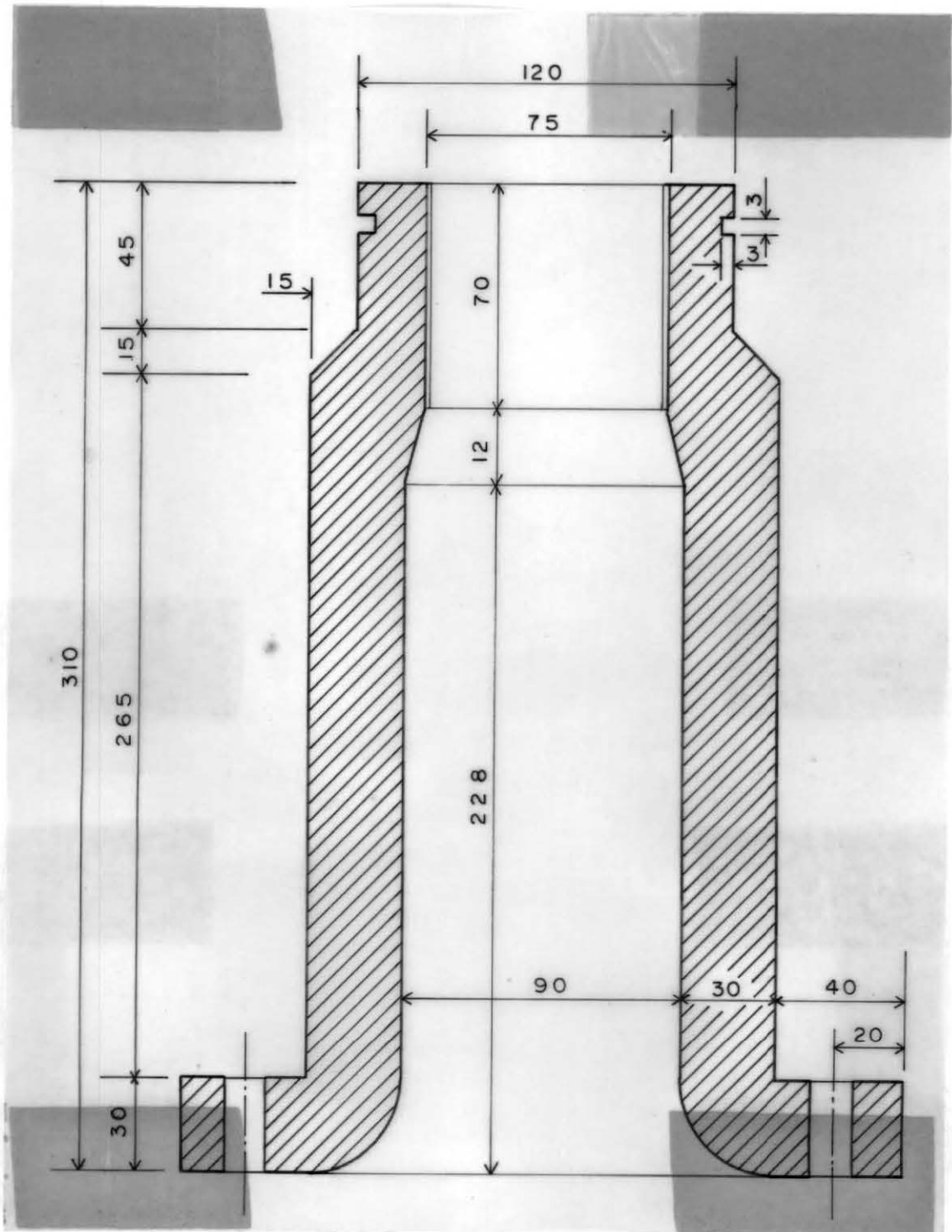
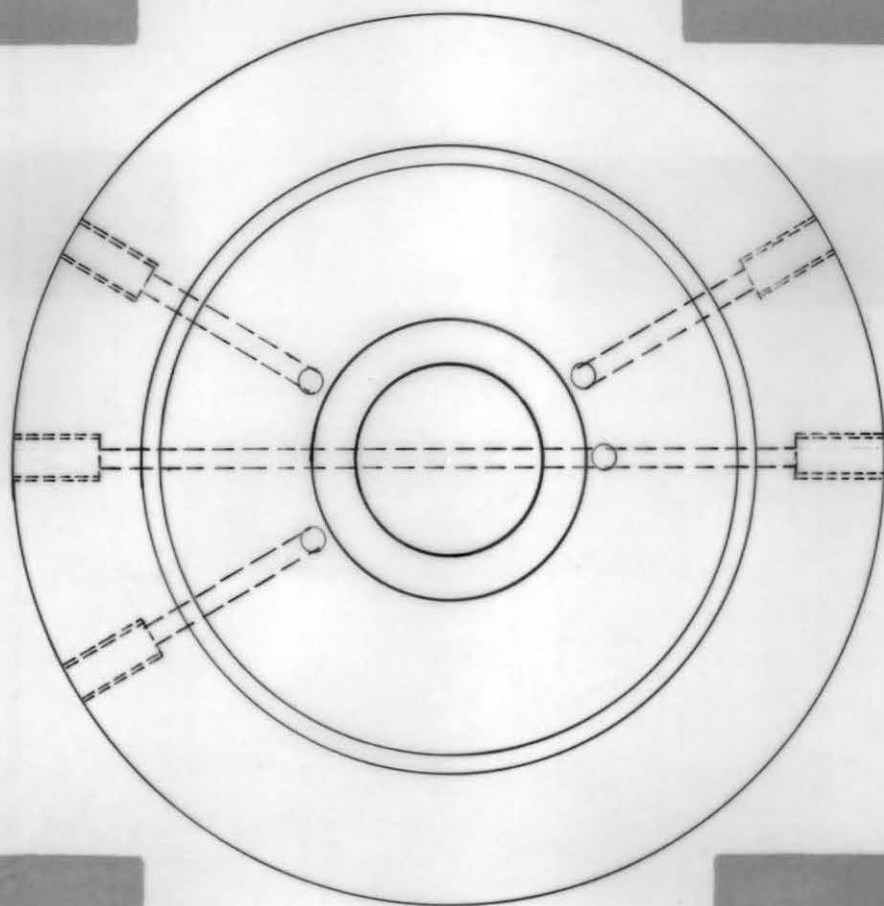
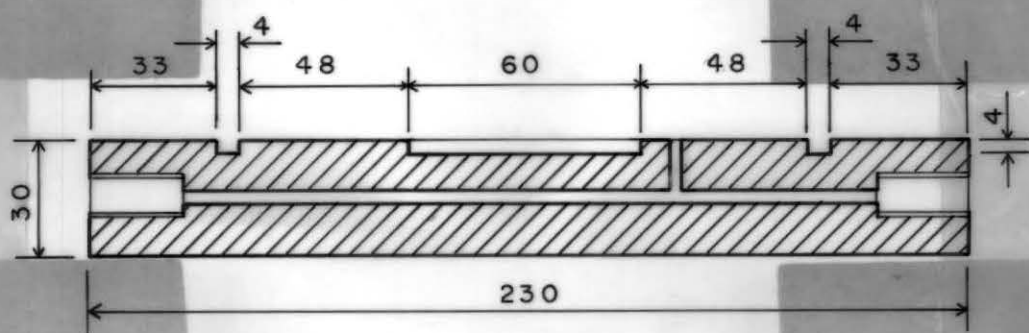
APENDICE B - COMPONENTES DA CELULA K_0 

Figura 1B - Corpo da Célula K_0 , de aço inoxidável de 30 mm de espessura



a)



b)

Figura 2B - Base da Célula, a) vista superior e b) corte da célula

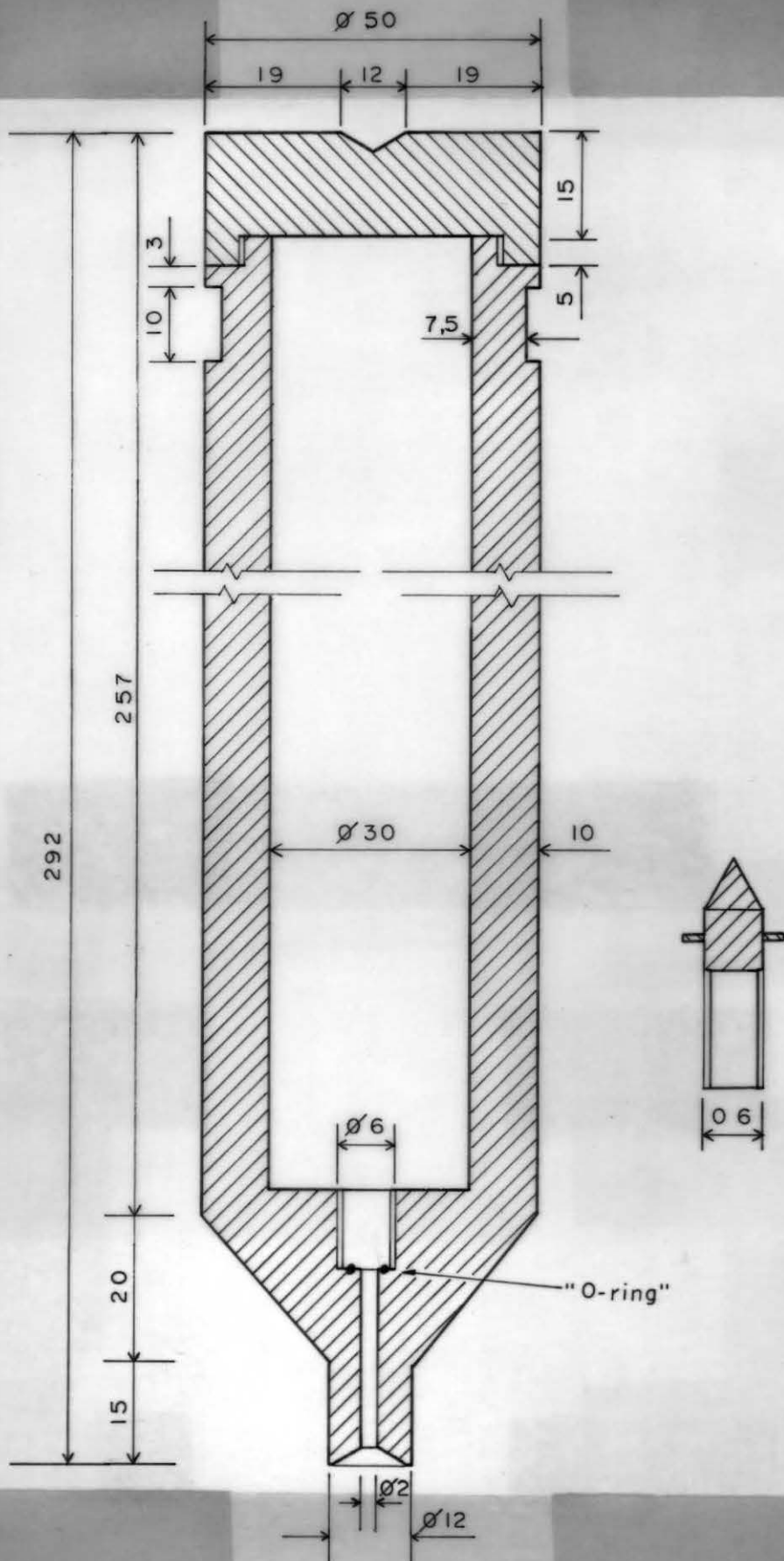
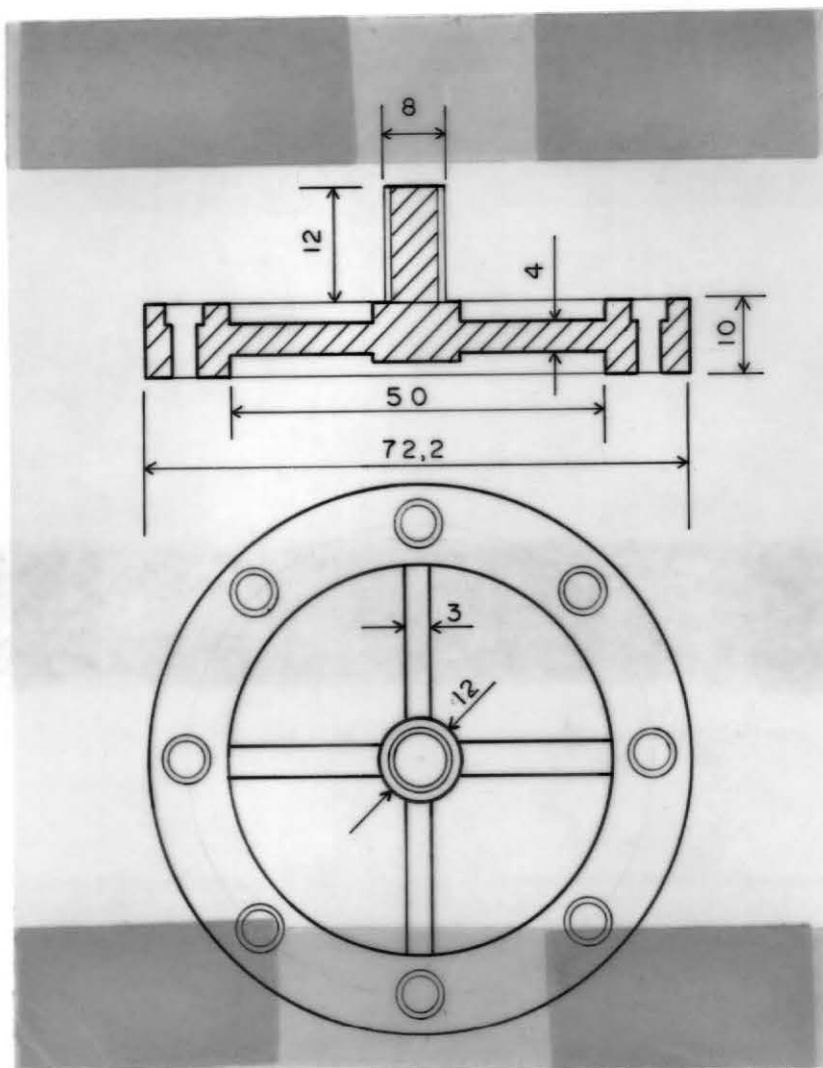
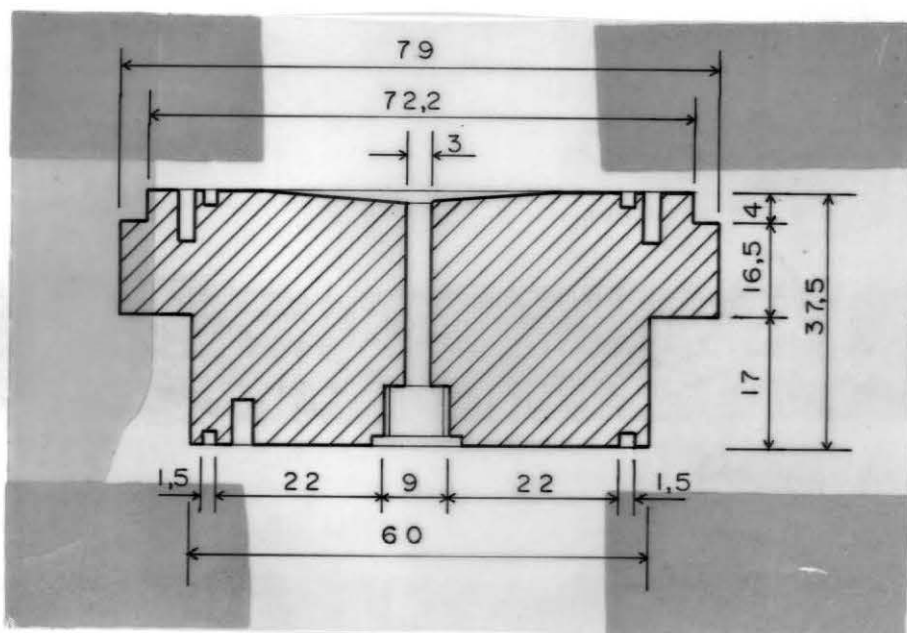


Figura 3B - Pistão de Carregamento



a)



b)

Figura 4B - Célula de Carga; a) cruzeta; e b) corte do corpo da célula de carga

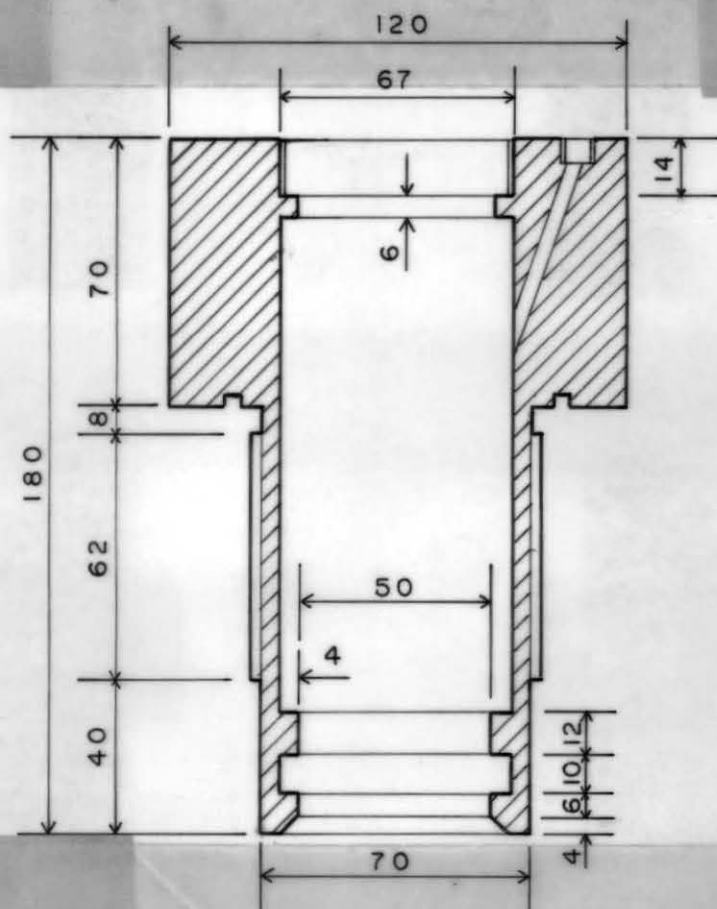


Figura 5B - Ante - Câmara

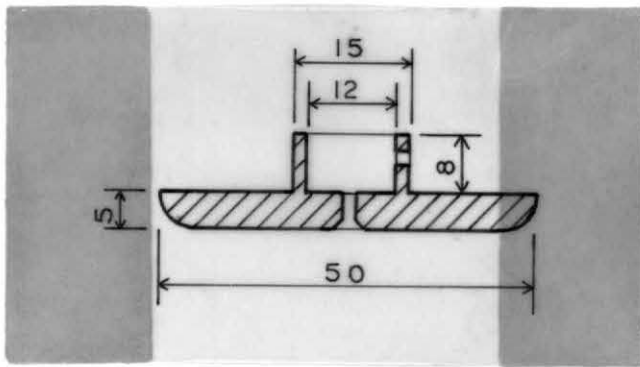


Figura 6B - Sapata de carregamento

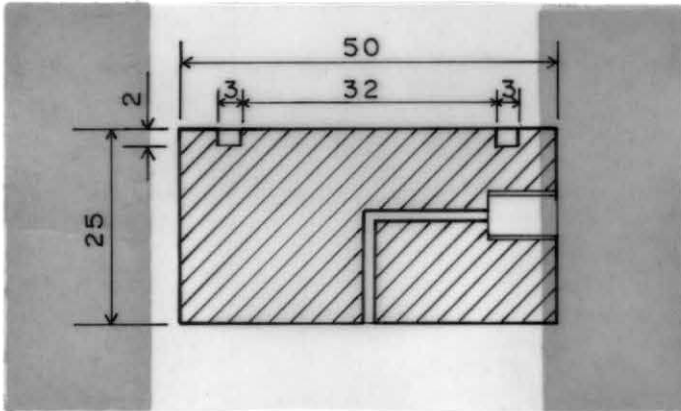


Figura 7B - "Top - cap"

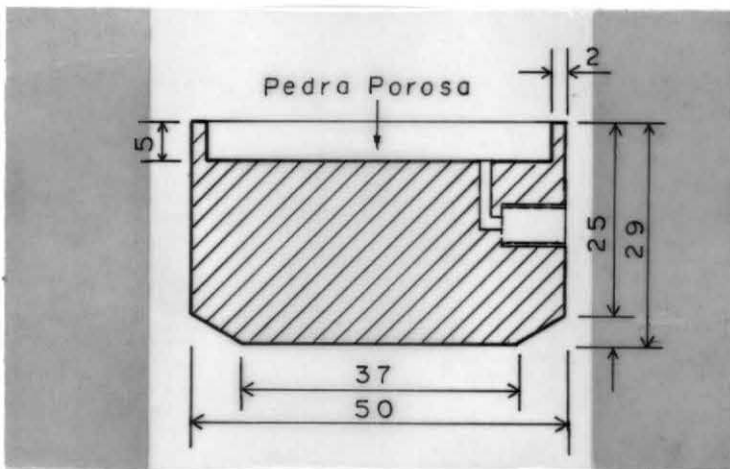


Figura 8B - Base do corpo de Prova

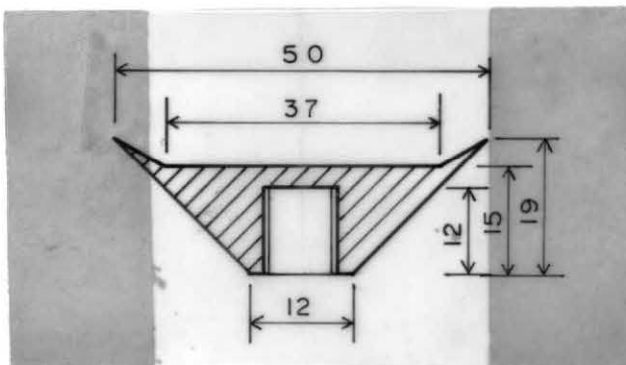


Figura 9B - Suporte para a base do corpo de prova